

Universidad  
Autónoma  
Metropolitana



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“SÍNTESIS DE BIODIESEL A PARTIR DE GRASA  
ANIMAL Y VEGETAL POR CATÁLISIS HETEROGÉNEA”

Tesis

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias e Ingeniería Ambiental

Presenta:

Ing. Jesús Josimar Oliva Montes

*Directores de Tesis:*

Dr. Ricardo López Medina

Dr. Julio Flores Rodríguez

## **Agradecimientos.**

A mis padres:

Por haberme dado la oportunidad de tener una educación de calidad y enseñarme a superarme y ser una persona de bien todos los días. Por todo lo que me han dado, su comprensión, cuidados, su tiempo y paciencia. Por estar conmigo y mis hermanos y poder compartir muchos logros juntos.

A mis hermanos:

Por todo el apoyo que me han brindado, por tantas convivencias y experiencias juntos que nos han fortalecido y que nos han hecho tener los mejores momentos que cualquiera se pueda imaginar.

A mis sobrinos:

Por existir y ser parte fundamental en mi vida y alegrar muchos ratos. Por ser una motivación constante.

A mi familia y amigos:

Por ser una constante en todo este proceso, por sus consejos, por todas las risas y alegrías y apoyo cuando se ha necesitado

A mis asesores y amigos:

Dr. Ricardo López Medina

Por su atención y estar siempre dispuesto cuando lo he necesitado. Por compartir conmigo sus conocimientos, experiencias, opiniones y enseñarme a ser mejor persona y profesionalista con su ejemplo. Por sus innumerables y valiosas aportaciones para este proyecto. Por ser uno de mis mentores.

Dr. Julio Flores Rodríguez.

Por todos los ratos agradables, su amistad y sabiduría, por ser uno de mis mentores y enseñarme las cosas más fundamentales en la investigación. Un abrazo donde sea que se encuentre.

## ***Resumen***

En este estudio se realizó la síntesis de biodiesel por medio de una serie de reacciones de transesterificación, evaluando la conversión, selectividad, rendimiento y cinética de cada una; además de la caracterización de los productos de dichas reacciones por medio de cromatografía de gases.

Las materias primas utilizadas fueron grasa de pollo cruda y aceite de ricino (proveniente de la higuera). Los catalizadores usados fueron hidróxido de potasio soportado en  $\gamma$ -alúmina ( $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) y zirconia sulfatada ( $\text{ZrO}/\text{H}_2\text{SO}_4$ ) con tiempos de 1, 6 y 9 horas. Las reacciones fueron hechas con un catalizador, un aceite y un tiempo a la vez con el objetivo de poder comparar los resultados y determinar cual es la forma más eficiente para producir biodiesel. El alcohol utilizado fue metanol en todos los casos

Se hizo una extracción en un equipo Soxhlet de los aceites contenidos en las materias primas (grasa de pollo y semillas de higuera trituradas) para comparar la cantidad de aceite contenido en cada una. El contenido de aceite en la higuera fue de 47.35% y en el pollo de 45.70%. Además, se hizo una extracción por medio de calor del aceite de pollo con un rendimiento del 46%.

La síntesis de los catalizadores se hizo por el método de sol-gel ( $\text{ZrO}/\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y método de impregnación ( $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). La caracterización de los materiales arrojó que ambos se pueden considerar como catalizadores nanoestructurados y con áreas superficiales grandes,  $105\text{ m}^2/\text{g}$  para  $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  y  $129\text{ m}^2/\text{g}$  para  $\text{ZrO}_2/\text{SO}_4$ .

La cromatografía de gases fue hecha en un equipo HP, utilizando un estándar de 37 metil ésteres marca Sigma Aldrich.

Los análisis arrojaron que la mejor conversión de los aceites fue con la catálisis básica, obteniendo eficiencias de hasta 69.01% con el aceite de pollo durante 9 horas. Las eficiencias con el catalizador ácido no fueron las esperadas, ya que no se llegó ni al 40%.

Los resultados de la selectividad y rendimiento indican que las reacciones tienen una tendencia a formar principalmente metil oleato y linoleato cuando se usa aceite de pollo y metil ricinoleato cuando se usa aceite de ricino; con rendimientos de hasta 22.80, 20.89 y 36.27% respectivamente.

La cinética de las reacciones fue de primer orden al inicio y de segundo orden al final en el caso de 1 y 6 horas; mostrando un mejor comportamiento en las de 9. En las reacciones hechas con aceite de ricino no se pudo determinar un comportamiento.

## ***Abstract***

In this study the synthesis of biodiesel was carried out by means of a series of transesterification reactions, evaluating the conversion, selectivity, yield and kinetics of each one; In addition to the characterization of the products of such reactions by means of gas chromatography.

The raw materials used were raw chicken fat and castor oil (jatropha). The catalysts used were potassium hydroxide supported on  $\gamma$ -alumina ( $\text{KOH} / \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) and sulfated zirconia ( $\text{ZrO} / \text{H}_2\text{SO}_4$ ) at times of 1, 6 and 9 hours. The reactions were done with a catalyst, an oil and an only time. This allowed comparing the results and determine which is the most efficient way to produce biodiesel. The alcohol used was methanol in all cases.

A Soxhlet equipment was used for extracted the oils contained in the raw materials to compare the amount of oil contained in each. The castor oil content in the jatropha was 47.35% and in the chicken of 45.70%. In addition, A heat method was used for extraction of the chicken oil, with a yield of 46%.

The synthesis of the catalysts was done by the sol-gel method ( $\text{ZrO}/\text{H}_2\text{SO}_4$ ) and impregnation method ( $\text{KOH}/ \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). The characterization of the materials showed that both can be considered as nanostructured catalysts and with large surface areas, 105  $\text{m}^2/\text{g}$  for  $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  and 129  $\text{m}^2/\text{g}$  for  $\text{ZrO}_2/\text{SO}_4$ .

Gas chromatography was done on HP equipment using a standard of 37 methyl esters brand Sigma Aldrich.

The analyzes showed that the best conversion of the oils was with basic catalysis, obtaining efficiencies of up to 69.01% with chicken oil during 9 hours. The efficiencies with the acid catalyst were bad, as it did not reach 40%.

The selectivity and yield results showed that the reactions have a conversoin trend to methyl oleate and methyl linoleate when using chicken oil and methyl ricinoleate when castor oil is used; with yields of up to 22.80, 20.89 and 36.27% respectively.

The kinetics of the reactions were first order at the beginning and second order at the end of reaction in the case of 1 and 6 hours; showing a better behavior with time of 9. In the reactions with castor oil a behavior can not be determined.

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Justificación.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Hipótesis .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>5</b>
4.1	Objetivo general .....	5
4.2	Objetivos específicos .....	5
<b>5</b>	<b>Antecedentes .....</b>	<b>6</b>
5.1	Combustibles fósiles y contaminación ambiental .....	6
5.2	Emisiones contaminantes en México y gases efecto invernadero (GEI) .....	8
5.3	Diesel y biodiesel .....	12
5.4	Métodos de producción de biodiesel .....	14
5.5	Análisis de ciclo de vida del biodiesel (ACV) .....	17
5.6	Higuerilla ( <i>Ricinus communis</i> ) .....	21
5.6.1	Propiedades fisicoquímicas del aceite de ricino .....	24
5.7	Producción avícola en México .....	26
5.7.1	Propiedades fisicoquímicas de la grasa de pollo. ....	30
5.8	Catalizadores .....	31
5.8.1	Catalizadores de zirconia sulfatada.....	34
5.8.2	Catalizadores de alúmina.....	35
<b>6</b>	<b>Estado del arte .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>41</b>
7.1	Recolección de las materias primas .....	42
7.2	Tratamiento de materias primas .....	43
7.3	Síntesis de los catalizadores .....	43
7.3.1	Zirconia sulfatada ( $\text{ZrO}_2/\text{SO}_4^{2-}$ ) .....	43
7.3.2	Hidróxido de Potasio soportado en alúmina ( $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) .....	44
7.4	Caracterización de los catalizadores .....	46

7.5	Reacción de transesterificación .....	47
7.6	Análisis del biodiesel.....	48
8	Resultados .....	49
8.1	Extracción del aceite .....	49
8.2	Caracterización de los catalizadores .....	50
8.2.1	Difracción de Rayos X.....	50
8.2.2	Determinación del Área Superficial por Fisisorción de Nitrógeno.....	52
8.3	Reacción de transesterificación y análisis del biodiesel .....	53
8.3.1	Conversión .....	53
8.3.2	Selectividad .....	56
8.3.3	Rendimiento.....	61
8.3.4	Cinética de las reacciones .....	63
9	Conclusiones .....	70
10	Bibliografía .....	71

Figura 1.	tabla con los principales contaminantes en la atmósfera. Fuente: Gómez (2008).....	7
Figura 2.	Gráfica de emisiones de contaminantes por fuente en México en 2005. Fuente: SEMARNAT, 2012.....	9
Figura 3.	Tabla de limitaciones para vehículos con motor a gasolina y tecnología Euro. Fuente NGK (2010).....	11
Figura 4.	Tabla con limitaciones para vehículos con motor diesel y tecnología Euro. Fuente NGK (2010).....	11
Figura 5.	Esquema de producción de diesel. Fuente: PEMEX (2008).....	12
Figura 6.	Tabla con propiedades fisicoquímicas del diesel (DIESEL-UBA). Fuente: PEMEX (2008)...	13
Figura 7.	Diagrama general de producción de biodiesel. Fuente: elaboración propia. ....	14
Figura 8.	Reacción de esterificación. Fuente: Biodisol, 2014.....	15
Figura 9.	Tabla con Estándares internacionales de calidad del biodiesel. Fuente: EURO FUEL TECH .....	16

Figura 10. Tabla con el proceso productivo del diesel. Fuente NREL (1998) .....	18
Figura 11. Tabla con proceso productivo del biodiesel. Fuente : NREL (1998).....	19
Figura 12. Ciclo de vida del biodiesel. Fuente: <a href="http://erika-biodiesel.blogspot.mx">http://erika-biodiesel.blogspot.mx</a> .....	19
Figura 13. Tabla con cuadro comparativo de consumo y ahorro de energía en el ciclo de vida del diesel y biodiesel. Fuente: (CIEMAT, 2007); IICA (2009); Ademe (2002) .....	20
Figura 14. Tabla con cuadro comparativo de las emisiones de CO <sub>2</sub> en el ciclo de vida del diesel y biodiesel. Fuente: elaboración propia con datos de (CIEMAT, 2007); IICA (2009); Ademe (2002).....	20
Figura 15. Planta de higuera. Fuente: fotografía propia. ....	21
Figura 16. Semilla de la higuera. Fuente: <a href="https://rambiocom.wordpress.com/2008/05/12/higuera-ricinus-communis/semilla-de-higuera/">https://rambiocom.wordpress.com/2008/05/12/higuera-ricinus-communis/semilla-de-higuera/</a> .....	22
Figura 17. Tabla con rendimientos en la producción de ricino según las condiciones agroecológicas. Fuente: Rico (2014) .....	22
Figura 18. Distribución de zonas con potencial productivo en México. Fuente: INIFAP, 2012 .....	23
Figura 19. Tabla con principales estados con mayor capacidad productiva de higuera. Fuente: INIFAP, 2012 .....	23
Figura 20. tabla con Propiedades fisicoquímicas del aceite de ricino. Fuente: Valderrama (1994); Panwar (2010); Salimon (2010) .....	25
Figura 21. Contenido de ácidos grasos en el aceite de ricino. Fuente: Valderrama (1994); Panwar (2010); Salimon (2010) .....	25
Figura 22. Pollos de engorde. Fuente: <a href="http://www.avipunta.com/antibioticos_avipunta_2015.htm">http://www.avipunta.com/antibioticos_avipunta_2015.htm</a> .....	26
Figura 23. Pollos con edad suficiente para su sacrificio. Fuente: <a href="http://negociorentablehoy.com/crianza-de-pollos-engorde/">http://negociorentablehoy.com/crianza-de-pollos-engorde/</a> .....	26
Figura 24. Tabla con nutrientes contenidos en el pollo. Fuente: elaboración propia con base en consulta bibliográfica .....	27
Figura 25. Gráfica de producción mundial de pollo estimada en abril para 2016. Fuente: elaboración propia con datos de USDA (2016) .....	28
Figura 26. Gráfica de porcentaje de consumo por país estimado en abril para el 2016. Fuente: elaboración propia con datos de USDA (2016) .....	29
Figura 27. Gráfica de producción por estados (en porcentaje) en México en 2015. Fuente: UMA (2016).....	30

Figura 28. Tabla de propiedades fisicoquímicas de la grasa de pollo. Fuente: Morales (2011). .....	30
Figura 29. Tabla de ácidos grasos presentes en la grasa de pollo. Fuente: Benjumea, Agudelo & Ríos (2009). .....	31
Figura 30. Tabla de propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los catalizadores. Fuente Ocsachoque (2012). .....	33
Figura 31. Tabla de diferencias entre catalizadores homogéneos y heterogéneos. Fuente Parra, 2012. ....	34
Figura 32. Tabla con comparación de diferentes variables en la síntesis de biodiesel. Fuente: Awad et al., (2013); Armendáriz et al., (2015). ....	39
Figura 33. Tabla con comparación de las propiedades del biodiesel según la materia prima. Fuente: Sattanathan (2013); Alptekin, Canakci y Sanli (2014) .....	40
Figura 34. Diagrama general de la metodología empleada .....	41
Figura 35. Material sumergido en solución sulfocrómica. ....	42
Figura 36. Semillas de higuera previas a su molienda. ....	42
Figura 37. Síntesis de la zirconia sulfatada por el método sol-gel. ....	44
Figura 38. KOH/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> previo a la eliminación de humedad en la estufa. ....	45
Figura 39. Catalizadores calcinados listos para su uso. ....	45
Figura 40. Tabla de reacciones de transesterificación hechas. ....	47
Figura 41. Tabla de resultados de la extracción de los aceites .....	49
Figura 42. Filtrado de grasa de pollo. ....	50
Figura 43. Difracción de rayos x del catalizador ácido ZrO <sub>2</sub> -SO <sub>4</sub> . La fase tetragonal (*) está presente así como una parte corresponde a la fase monoclinica. ....	51
Figura 44. Difracción de rayos "X" del catalizador básico KOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....	52
Figura 45. Isotermas de adsorción de N <sub>2</sub> y distribución de tamaño de poro. ....	53
Figura 46. Eficiencias de conversión de las reacciones de transesterificación hechas .....	54
Figura 47. Gráfico comparativo de las conversiones obtenidas en las diferentes reacciones .....	55
Figura 48. Gráfica de conversión según el catalizador y el aceite usado .....	55
Figura 49. Gráfica de selectividad del biodiesel de pollo .....	56
Figura 50. Gráfica de selectividad del biodiesel de ricino .....	57



Figura 51. Tabla comparativa de la selectividad en este estudio con otras investigaciones.....	58
Figura 52. Gráfica de comportamiento de la selectividad en B2 .....	59
Figura 53. Gráfica de comportamiento de selectividad en B2 .....	60
Figura 54. Gráfica de comportamiento de selectividad en B6 .....	60
Figura 55. Gráfica de comportamiento de selectividad en B6 .....	61
Figura 56. Gráfica de rendimiento de las reacciones de pollo .....	62
Figura 57. Gráfica de rendimiento en las reacciones de ricino .....	62
Figura 58. Cinética de reacciones de una hora .....	63
Figura 59. Gráfica de cinética de las reacciones de 6 horas.....	64
Figura 60. Gráfica de cinetica de las reacciones de 9 horas.....	64
Figura 61. Cromatograma biodiesel 5 (B5) de 60 minutos .....	66
Figura 62. Cromatograma de biodiesel 10 (B10) de 6 horas.....	67
Figura 63. Cromatograma biodiesel 3 (B3) de 60 minutos .....	68
Figura 64. Cromatograma del estandar de metil esteres utilizado.....	69

# 1 INTRODUCCIÓN

---

A nivel global, el consumo de diésel y gasolina para el transporte ha crecido más rápido que el consumo total de productos petrolíferos en las últimas cuatro décadas. El aumento del consumo de estos pasó de aproximadamente 30% en 1971 a alrededor del 46% en 2007. El diésel ha crecido más rápido que la gasolina, pues de tan sólo un 5% en 1971 de la demanda, pasó hasta un 19% en 2007, mientras que las acciones de la gasolina, que era alrededor de 25% en 1971, creció menos de 2 puntos porcentuales en 1997. Estos combustibles son considerados estratégicos y saber qué tan rápido crecerá su uso en el futuro y cómo su mezcla cambiará en las próximas décadas tiene importantes implicaciones en la seguridad del acceso al petróleo, las emisiones de carbono relacionadas con el éste, y los patrones de inversiones en su refinamiento (Dahl, 2012).

Según estimaciones de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEC por sus siglas en inglés) (OPEP, 2016), la demanda mundial de petróleo en 2015 fue de 92,978,600 barriles diarios; de gasolina fue de 24,611,600 barriles diarios; mientras que la de diesel fue de 6,837,000 barriles diarios.

La demanda de energía, en particular la de combustibles derivados del petróleo, está incrementando a diario en todo el mundo; esto provoca que se incremente las emisiones de contaminantes a la atmósfera. En comparación con 1990, las emisiones globales serán casi el doble en 2035. Los precios de productos derivados del petróleo, las preocupaciones ambientales en todo el mundo, así como el rápido agotamiento del diesel fósil han motivado al ser humano a buscar fuentes alternativas de combustible que proporcionen una combustión más limpia de motores diesel y gasolina. Por lo tanto, se ha convertido en un tema global el desarrollo de combustibles alternativos limpios, que estén disponibles a nivel nacional, ambientalmente aceptables y técnicamente factibles (Mofijur et al., 2014).

Por otra parte, los desafíos de mejorar la economía de combustible y satisfacer las legislaciones ambientales cada vez más estrictas, también han llevado a los investigadores a buscar fuentes de energía alternativas. En los últimos años, el biodiesel ha surgido como un prominente candidato de combustible alternativo debido a su potencial uso en motores de encendido por compresión, ya sea como mezcla con diesel o como combustible puro, sin requerir ninguna modificación del motor cuando hay mezclas. Aunque el biodiesel en su forma rudimentaria existía desde el inicio de los motores diesel, la ola actual de su producción se inició en la década de 1980 (Korbitz, 1999).

El biodiesel por tanto, se ha ganado la atención de todo el mundo en los últimos años como un combustible alternativo que tiene una serie de propiedades favorables tales como alta degradabilidad, no tóxico, sin contenido de azufre, bajas emisiones de monóxido de carbono, materiales particulados y los hidrocarburos no quemados (Veljković, Banković y Stamenković, 2015).

El presente estudio tiene la finalidad de obtener biodiesel a partir de dos materias primas consideradas como desechos y/o no competitivas con la alimentación del ser humano (grasa de pollo cruda y aceite de ricino), la respectiva evaluación del proceso de conversión de ácidos grasos a metil ésteres (llamado reacción de transesterificación) y la eficiencia de esta conversión, así como el comportamiento de la reacción química. La forma en que se obtuvo es usando catálisis heterogénea comparando el rendimiento en la reacción de transesterificación de dos materiales catalíticos diferentes y ambas materias primas.

## 2 JUSTIFICACIÓN

---

La contaminación ambiental causada por el uso de combustibles fósiles en el transporte de las masas ha provocado problemas en muchas ciudades a nivel mundial, problemas tanto de salud en la población, alteración de la calidad del aire, alteración en la calidad de vida, entre otros. Además de los problemas sociales y ambientales generados por la extracción, transporte y refinamiento del petróleo para la obtención de los combustibles necesarios.

En el caso particular de la Ciudad de México, la gran demanda de estos combustibles ha provocado durante años que las enfermedades relacionadas con una mala calidad del aire aumenten, lo que se ve reflejado en un aumento en la demanda de los servicios médicos por parte de la población, ausentismo laboral y mayores costos para el gobierno en el tratamiento de este tipo de enfermedades.

Según el último censo nacional, en la Ciudad de México habitaban 8,851,080 personas en 2010(INEGI, 2016), lo que representa una mayor demanda de todos los servicios básicos como agua potable, luz, alimentos, servicios urbanos, etc. Todo esto requiere energía y combustibles (para su producción y/o transporte) además de la generación de residuos que esto conlleva y que también se considera como un problema ambiental y social.

Con el fin de poder ofrecer una solución real a los problemas de contaminación por quema de combustibles fósiles y, prácticamente, el nulo aprovechamiento de desechos, se decidió que la obtención del biocombustible diésel sea lo menos agresiva con el ambiente usando el residuo de la grasa de pollo cruda, ya que actualmente no tiene un uso específico y por lo regular se dispone de ella en rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, lo que provoca contaminación del suelo, acumulación de fauna nociva, posibles enfermedades, contaminación visual, entre otros; además de ser un desecho de la industria alimenticia.

Paralelamente, se obtuvo biodiesel con aceite de ricino, que no tiene un uso alimenticio por contener ricina, la cual es tóxica para el ser humano y los animales, por lo que no hay competencia por él con la industria alimenticia. El aceite de ricino representa una materia prima viable para la producción de biodiesel debido a que es extraído de la semilla de higuierilla, una planta endémica de zonas tropicales y subtropicales, que crece en forma silvestre en muchos lugares, no requiere de condiciones especiales para su cultivo (humedad, temperatura, etc.) y es vista como maleza en México (García et al., 2009).

Los catalizadores a usar son la zirconia sulfatada y el hidróxido de potasio soportado en alúmina, usándose por separado con cada materia prima ya que no se han realizado estudios similares con los sustratos mencionados y estos catalizadores.

### 3 HIPÓTESIS

---

El biodiesel se puede producir a partir de grasa de pollo cruda y aceite de ricino como materias primas mediante el uso de catalizadores de hidróxido de potasio en alúmina y zirconia sulfatada con una alta eficiencia de conversión en la reacción y tener una calidad similar al diésel de petróleo.

## 4 OBJETIVOS

---

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

---

Obtener biodiesel usando como materia prima grasa cruda de pollo y aceite de ricino con Hidróxido de Potasio soportado en  $\alpha$ -alúmina ( $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) y Zirconia Sulfatada ( $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ ) como catalizadores.

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

---

1. Caracterizar las materias primas.
2. Sintetizar por medio del método de Sol-Gel de los diferentes catalizadores  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  y  $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .
3. Caracterizar de los catalizadores usando diferentes técnicas de caracterización de materiales.
4. Evaluar del rendimiento de la reacción de transesterificación a diferentes tiempos y determinar la cinética de reacción estableciendo un posible mecanismo de la misma.
5. Evaluar y comparar la actividad, conversión, selectividad y rendimiento en la producción de biodiesel con ambas materias primas y el empleo de los dos catalizadores.

## 5 ANTECEDENTES

---

### 5.1 COMBUSTIBLES FÓSILES Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

---

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en la atmosfera de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos. Estas sustancias vienen de cualquier fuente; pueden llegar a dañar algunos materiales, reducir la visibilidad y/o producir olores desagradables (Ataz y de Mera, 2004).

La explotación de algunos combustibles fósiles como el petróleo (convertidos en gasolina y diésel), gas natural y carbón, que actualmente satisfacen la mayor parte de la creciente demanda mundial de energía, están destinados a acabar con relativa rapidez. Más allá de este punto, sus productos de combustión son la principal causa de algunos problemas mundiales como el efecto invernadero, el agujero en la capa de ozono, la lluvia ácida y la contaminación del medio ambiente generalizado, por lo que su impacto es extremadamente perjudicial (Nicoletti et al., 2015).

Es por ello que en los últimos años, hemos sido testigos de una creciente preocupación por los posibles efectos de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico en el sistema climático. Los estudios hechos por diversos científicos nos permiten afirmar con confianza que la Tierra se calentará durante los próximos siglos como resultado del uso de combustibles fósiles. Las predicciones de la magnitud de éste calentamiento se limitan, principalmente por las decisiones futuras de los líderes mundiales que no tienen el conocimiento en lo que respecta al uso de estos combustibles y sus consecuencias ambientales (Zecca y Chiari, 2010).

El problema de la contaminación del aire ha alcanzado límites de peligrosidad considerable a la salud humana y para el medio ambiente que le rodea. Esta situación es la consecuencia directa de la acumulación continua y abundante en la atmósfera de los productos de la combustión de diversas fuentes que emplean, sobre todo, los combustibles fósiles. Desafortunadamente, estos niveles de emisiones se han incrementado proporcionalmente de acuerdo con el progreso industrial; perseguido por diferentes naciones durante mucho tiempo, junto al crecimiento relativo de la población (Churchill, 1997; Nicoletti et al., 2015).

Tal vez el contaminante más nocivo de la combustión del diésel es el hollín que está formado principalmente por partículas de carbono (materia en partículas) en las que se combinan los hidrocarburos. Estas minúsculas partículas se introducen en los pulmones durante el proceso de respiración. Su diámetro es más pequeño que el de un micrómetro y las partículas del hollín provocan también un aumento en las enfermedades respiratorias como el asma, la bronquitis, el enfisema, entre otras (Greenpeace, 1999).

Contaminante	Características	Efectos generales sobre la salud	Efectos generales sobre el ambiente
Óxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	Contaminante primario y también precursor en la formación de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en forma de sulfatos; también puede generar ácido sulfúrico. Gas efecto invernadero.	Agrava los problemas respiratorios (edema, asma, bronquitis) y cardiovasculares	Contribuye a la formación de lluvia ácida, con corrosión en materiales y daños a la vegetación
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	Es un contaminante primario y también precursor en la formación de PM <sub>2.5</sub> y de ozono. Gas efecto invernadero.	Daño a pulmones y vías respiratorias, formación de edemas, aumento en la susceptibilidad a infecciones respiratorias	Contribuye a la formación de lluvia ácida, con corrosión en materiales y daños a la vegetación
Monóxido de Carbono (CO)	Gas resultante de la combustión incompleta en los vehículos	Reduce la capacidad de transporte de oxígeno a la sangre; afecta a los sistemas cardiovascular, nervioso y pulmonar	
Material Particulado (PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> )	Partículas dispersas en la atmósfera como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen de diámetro igual o inferior a 10µm; la fracción respirable más pequeña es conocida como PM <sub>2.5</sub> , es decir inferior a 2.5µm	Debido a su tamaño puede alcanzar los alvéolos pulmonares; potencial cancerígeno y mutagénico; alergias, asma, bronquitis crónica, silicosis	Daño a la vegetación, deterioro de visibilidad, contaminación de suelos, alteraciones del patrón de lluvias
Contaminante	Características	Efectos generales sobre la salud	Efectos generales sobre el ambiente
Ozono troposférico (O <sub>3</sub> )	Es un contaminante secundario resultante de la reacción química entre NOx y compuestos orgánicos en presencia de luz solar. Causa inversión térmica.	Tos y dolor de cabeza, irritación de ojos, nariz y garganta; dolor de tórax; cierre de las vías respiratorias; náuseas; aumento en la incidencia de ataques asmáticos.	Daños en plantas, destrucción de la capa de ozono
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Gases fotoquímicamente reactivos, precursores de ozono	Cancerígenos y mutagénicos	Daños a la vegetación y disminución de cosechas
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Es un contaminante primario, incoloro y esta en la atmosfera de forma natural. Gas efecto invernadero	No es tóxico	Gas efecto invernadero que impide la salida de radiación de la Tierra.

FIGURA 1. Tabla con los principales contaminantes en la atmósfera. Fuente: Gómez (2008)



Dentro de la población humana, los grupos más susceptibles a los efectos adversos de la contaminación del aire son los niños, ancianos y aquellos con enfermedades cardíacas o respiratorias. Dichos efectos en la salud incluyen incrementos en síntomas respiratorios, disminución de la función pulmonar, incremento en la hospitalización y consultas médicas por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, incremento de la morbilidad respiratoria, en el ausentismo laboral y escolar por restricción de las actividades y en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares (Bateson y Schwartz, 2004; Muñoz, Quiroz y Paz, 2007). La tabla de la figura 1 muestra los principales contaminantes que se emiten al aire por la quema de combustibles fósiles y sus efectos en la salud y en el ambiente.

## **5.2 EMISIONES CONTAMINANTES EN MÉXICO Y GASES EFECTO INVERNADERO (GEI)**

---

En el año 2013 alrededor de 59 millones de mexicanos en las 34 ciudades más grandes del país estaban expuestos a la mala calidad del aire y, por tanto, a las enfermedades relacionadas con dicha situación. Con esta exposición se estima que los costos en México del 2010 al 2013 de la contaminación del aire fueron de aproximadamente 14 mil millones de pesos. Sin embargo, de seguir con la situación actual y que las autoridades competentes no tomen acciones, es posible que a finales de 2018 las pérdidas monetarias por la mala calidad del aire sean de 20 mil millones de pesos (IMCO, 2013).

Según el Inventario Nacional de Emisiones de la SEMARNAT (2012) la principal fuente de contaminación atmosférica en 2005 fue el transporte. Es decir todo tipo de transporte urbano, público o privado y que transita a lo largo de las diferentes autopistas y carreteras nacionales. Mientras que las menores emisiones fueron por transporte no carretero, es decir aviación, embarcaciones marinas, locomotoras, etc. Estas emisiones se pueden apreciar en la gráfica de la figura 2.

Dicho informe también plantea que el 76% de las emisiones en nuestro país son CO<sub>2</sub> y CO, seguido de compuestos orgánicos volátiles (COV's) con el 9%, SO<sub>2</sub> con 6%, NO<sub>x</sub> con 5% y otros compuestos nitrogenados, partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

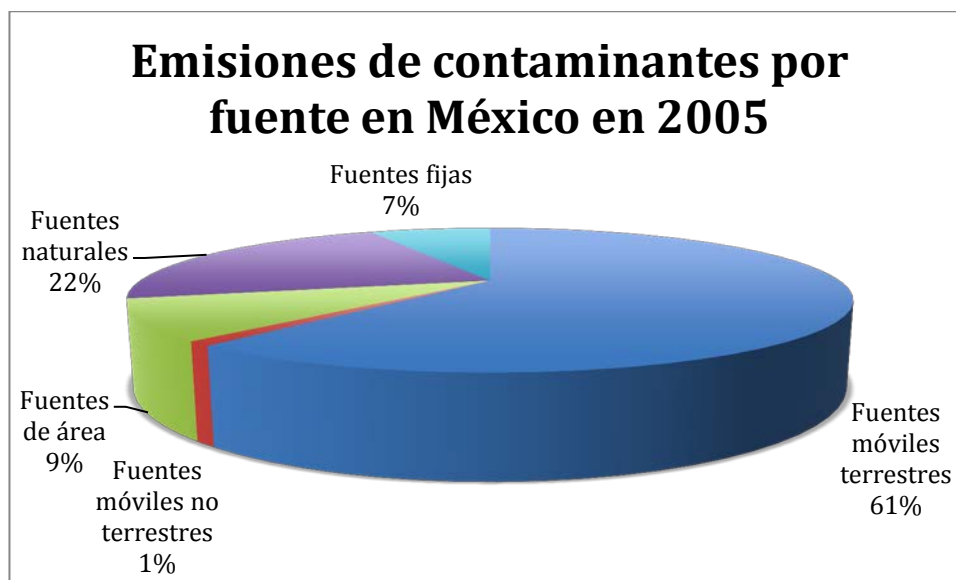


FIGURA 2. Gráfica de emisiones de contaminantes por fuente en México en 2005. Fuente: SEMARNAT, 2012.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados, más de la mitad de las cuales recae en las poblaciones de los países en desarrollo. La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), con una población cercana a los 20 millones de habitantes, se encuentra dentro del grupo de ciudades que padece de manera más intensa el problema de deterioro de la calidad del aire. A pesar que se han llevado a cabo programas y se han invertido grandes cantidades de dinero, el problema de la contaminación del aire sigue presente, aun cuando se reconocen los avances conseguidos en algunos contaminantes (Ferrer y Escalante, 2009).

Las emisiones en la Ciudad de México son casi en su totalidad antropogénicas (SEMARNAT, 2012) debido a que es una ciudad industrializada, con alto aforo vehicular y alta afluencia de gente. Se puede plantear una alternativa real para la disminución de las emisiones usando otro tipo de combustibles más amigables con el ambiente, vehículos eléctricos e incluso fomentar el uso de otro tipo de transportes como bicicletas y motocicletas.

Las emisiones vehiculares dentro de la ZMVM son de interés especial por incluir contaminantes que por sí mismos y a la par de sus productos que se generan debido a una serie de reacciones en la atmósfera tienen impactos adversos a la salud, como es el caso del ozono y las partículas suspendidas secundarias (nitratos y sulfatos). Estos contaminantes incluyen monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas suspendidas, carbono negro y otros tóxicos con propiedades carcinogénicas (benceno, formaldehído, acetaldehído, 1-3 butadieno). A estas emisiones hay que sumarles las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  ya que respirarlas se incrementa la tasa de enfermedad y mortalidad para todas las edades, en especial para los grupo más vulnerables (Pope y Dockery 2006; Romieu et al, 2012).

Dentro de los contaminantes en la atmósfera están los denominados “gases de efecto invernadero” (GEI), que se pueden definir como los gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes; esta propiedad causa el efecto invernadero. Los GEI emitidos por acción del hombre son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CF}_4$ , HFC's, y  $\text{SF}_6$  (IPCC, 2001).

El aumento en la concentración de los GEI produce un incremento de la opacidad infrarroja de la atmósfera, y por lo tanto, una radiación efectiva en el espacio desde una altitud mayor a una temperatura más baja. Esto causa un forzamiento radiativo, es decir, un desequilibrio que solo puede ser compensado con un aumento de la temperatura del sistema superficie–troposfera. A esto se denomina ‘efecto invernadero aumentado’ (IPCC, 2001). Esto a su vez, genera un aumento en las temperaturas del planeta denominado “calentamiento global”. Las consecuencias de éste calentamiento global es el aumento de la temperatura de las aguas oceánicas, derretimiento de los hielos polares y por tanto el aumento de las corrientes marítimas, sequías, desertificación, etc. De continuar con esta situación, según el IPCC, se prevé que a futuro el aumento en los niveles de los océanos podría culminar con la desaparición de las ciudades costeras.

El calentamiento global es considerado una de las amenazas más serias para el medio ambiente global. Se cree que tendrá un impacto negativo sobre la salud pública, la seguridad alimenticia, la disponibilidad de agua u otros recursos naturales, la biodiversidad, la actividad económica de los sectores sensibles al clima y sobre todo la infraestructura física, entre otros. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en ingles) la industria del transporte es el segundo mayor sector en cuanto a emisiones de  $\text{CO}_2$  al ambiente, sólo detrás de la generación de energía, que en gran parte también depende de la quema de combustibles fósiles (CEPAL, 2008; Gómez, 2008).

Con el objetivo de reducir las emisiones al ambiente del transporte público (principal consumidor de diésel en el mundo) la Unión Europea ha venido desarrollando las llamadas normas “EURO” que estipulan un máximo de emisiones para vehículos nuevos con motor diesel y gasolina. Estas normas y sus cambios en los recientes años se muestran en las tablas de las figuras 3 y 4. En México se cuentan con autobuses de los servicios Metrobus y Méxibus en el DF y Estado de México respectivamente certificados con la norma EURO V.

Limites de emisiones para vehículos nuevos con motor de gasolina						
Norma	Válida a partir de	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
EURO I	12/92	2.72	-	-	0.97	-
EURO II	01/97	2.20	-	-	0.5	-
EURO III	01/00	2.30	0.20	0.15	-	-
EURO IV	01/05	1.00	0.10	0.08	-	-
EURO V	09/09	1.00	0.10	0.06	-	0.005*
EURO VI	08/14	1.00	0.10	0.06	-	0.005*

FIGURA 3. Tabla de limitaciones para vehículos con motor a gasolina y tecnología Euro. Fuente NGK (2010)

\*Con inyección directa.

Limites de emisiones para vehículos nuevos con motor diésel						
	Válida a partir de	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
EURO I	01/92	3.16	-	-	1.13	0.14
EURO II	01/96	1.00	0.15	0.55	0.70	0.08
EURO III	01/00	0.64	0.06	0.50	0.56	0.05
EURO IV	01/05	0.50	0.05	0.25	0.30	-
EURO V	09/09	0.50	0.05	0.18	0.23	0.005
EURO VI	08/14	0.50	0.09	0.08	0.17	0.005

FIGURA 4. Tabla con limitaciones para vehículos con motor diesel y tecnología EURO. Fuente NGK (2010)

En ambas tablas se puede notar como las emisiones máximas permisibles van disminuyendo según la Norma, esto puede ser por los avances tecnológicos en la industria automotriz que han logrado la reducción de emisiones contaminantes y mayor rendimiento de los vehículos.

### 5.3 DIESEL Y BIODIESEL

El diesel es un combustible muy ampliamente usado en el mundo por vehículos automotores, principalmente por camiones de transporte pesado o de pasajeros, maquinaria grande, barcos, etc., algunos vehículos compactos tienen motores diseñados para este combustible. Además tiene ciertas características de acuerdo al uso que será destinado.

Es producido en las refinerías a partir de la destilación del petróleo en diferentes fracciones, las cuales son separadas en las torres de destilación de acuerdo a su peso molecular y temperatura de ebullición. Las fracciones más ligeras, incluyendo gasolinas y gas LP, vaporizan y suben hasta la parte superior de la torre donde se condensan. Los líquidos medianamente pesados, como el queroseno y la fracción diésel, se quedan en la parte media. Los líquidos más ligeros y los gasóleos ligeros primarios, se van separando en la parte superior, mientras que los más pesados en el fondo. Las gasolinas contienen fracciones que ebullen por debajo de los 200°C mientras que en el caso del diésel sus fracciones tienen un límite de 350°C. El combustible diesel, también se manufactura en muchos casos a partir de mezclas de gasóleos con querosenos y aceite cíclico ligero, el cual es producto del proceso de desintegración catalítica fluida. Actualmente el proceso de fabricación es muy complejo ya que se necesita mezclar diferentes fracciones de petróleo para cumplir con las especificaciones de calidad (PEMEX, 2008).

En la figura 5 se puede ver cómo llega el petróleo crudo a la refinería, donde se hace un prefraccionamiento o separación de fases, de ahí se separa de acuerdo a su peso molecular. Después el petróleo es calentado, se realiza la destilación atmosférica y, por último, la destilación al vacío, donde se obtiene el gasóleo, que será convertido en diesel.

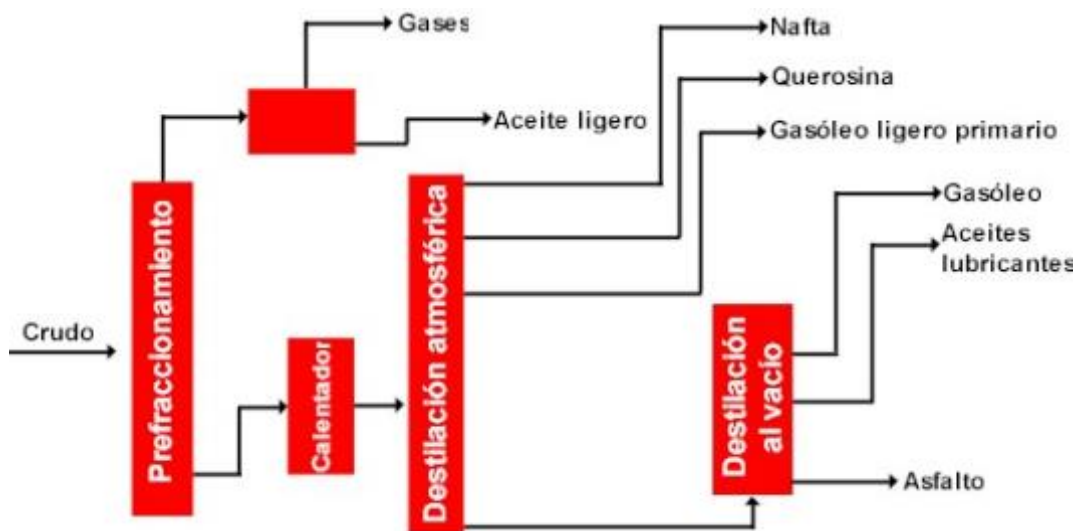


FIGURA 5. Esquema de producción de diesel. Fuente: PEMEX (2008)

Las características fisicoquímicas más importantes del diésel derivado del petróleo usado en México se muestran en la figura 6.

Parámetro	Rango
Peso Molecular:	ND
Temperatura de ebullición (°C)	275
Temperatura de fusión (°C)	ND
Temperatura de inflamación (°C)	45 mínimo
Temperatura de auto-ignición (°C)	254-285
Presión de vapor a 21°C (kPa)	ND
Densidad:	<1.0
Parámetro	Rango
Cantidad de azufre	15 mg/kg
Cantidad de aromáticos	35% vol. (máx.)
Viscosidad cinemática a 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	1.9-4.1

FIGURA 6. Tabla con propiedades fisicoquímicas del diesel (DIESEL-UBA). FUENTE: PEMEX (2008)

La Agencia de los Estados Unidos de protección al ambiente (EPA) (EPA, 2014) define al biodiesel como “un combustible alternativo a partir de aceite vegetal virgen o aceite vegetal usado. Incluso las grasas de origen animal como el sebo y aceite de pescado se pueden utilizar para hacer combustible biodiesel. A diferencia de los combustibles fósiles, es renovable y puede ser mezclado con el diesel convencional para obtener diferentes mezclas tales como B2 (2% de biodiesel y 98% diésel convencional), B20 (20% biodiesel) o cualquier otra proporción, pero también puede ser utilizado al 100% (B100)”. Puede ser un líquido que va desde un color amarillo hasta casi incoloro.

En particular, el biodiesel tiene un número relativamente alto de índice de cetano y aproximadamente el 90% del contenido de energía de diésel de petróleo, lo que lo hace un atractivo sustituto de éste. Químicamente, el biodiesel es equivalente a los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) o ésteres de etilo (FAEE), producidos de triacilglicerolos a través de transesterificación o de ácidos grasos a través de esterificación. Los esteres metílicos de ácidos grasos son las especies de biodiesel más utilizados hoy en día, mientras que los ésteres etílicos de los ácidos grasos (FAEE) hasta ahora han sido sólo producidas en laboratorio o en escala piloto (Ravindra y Raman, 2015).

El proceso de producción del biodiesel se puede resumir a unos cuantos pasos cómo lo muestra la figura 7.

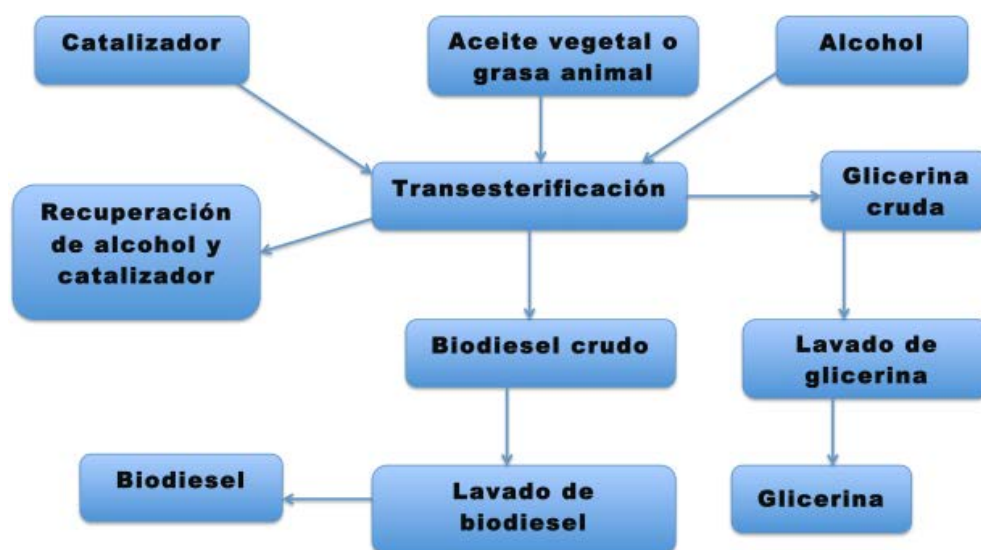


FIGURA 7. Diagrama general de producción de biodiesel. Fuente: elaboración propia.

#### 5.4 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Actualmente, la producción industrial de biodiesel es un proceso químico basado principalmente en la transesterificación de los aceites que sirven como materia prima utilizando catalizadores alcalinos o ácidos. Sin embargo, recientes investigaciones a escala de laboratorio ha tenido como objetivo el desarrollo de las técnicas de producción con diferentes tipos de catalizadores a los ya existentes, cómo puede ser enzimáticos ó incluso sin estos. Cada proceso tiene sus propias ventajas y desventajas. Cada proceso catalítico difiere en sus parámetros de proceso (Ravindra y Raman, 2015).

En el caso de la esterificación los ácidos carboxílicos pueden ser esterificados por alcoholes en presencia de un catalizador ácido adecuado. El paso inicial es la protonación del ácido para dar un ion hidronio, que puede someterse a una reacción de intercambio con un alcohol para dar el intermedio, y esto a su vez puede perder un protón para convertirse en un éster. Cada paso en el proceso es reversible, pero en presencia de un gran exceso del alcohol, el punto de la reacción de equilibrio se desplaza de modo que la esterificación procede prácticamente hasta su finalización. Sin embargo, con la presencia de agua, que es un donador de electrones más fuerte que los alcoholes alifáticos, la formación del intermedio no se ve favorecida y la esterificación no procederá totalmente (Christie, 1993). La figura 8 muestra el proceso de esterificación.

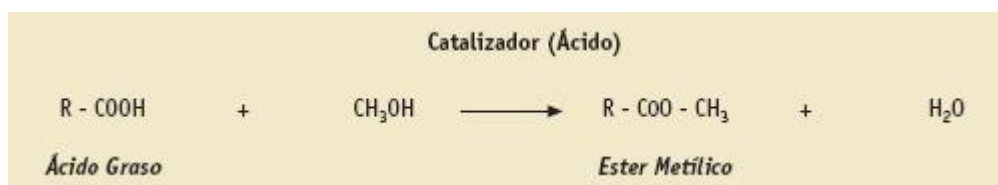


FIGURA 8. Reacción de esterificación. Fuente: BIODISOL, 2014.

La transesterificación, en cambio, es el término general utilizado para describir las reacciones orgánicas en donde un éster se transforma en otro a través del intercambio del resto alcoxi. Cuando el éster original se hace reaccionar con un alcohol, el proceso de transesterificación se denomina alcoholisis. La transesterificación es una reacción de equilibrio y la transformación se produce esencialmente mediante la mezcla de los reactivos. Sin embargo, la presencia de un catalizador (generalmente un ácido o base fuerte) acelera considerablemente el ajuste del equilibrio. Con el fin de lograr un alto rendimiento del éster, el alcohol tiene que ser usado en exceso (Schuchardt, 1998).

La transesterificación se produce bajo condiciones similares a la esterificación. En este caso, la protonación inicial del éster es seguida por la adición del alcohol en el intercambio para dar el intermedio, que puede ser disociado a través de las transiciones de estado para producir el éster. De nuevo, cada paso es reversible y en presencia de un gran exceso del alcohol, el punto de la reacción de equilibrio se desplaza de manera que el producto es casi completamente el éster requerido. El agua debe una vez más ser excluida, ya que produciría alguna hidrólisis por la disociación de un compuesto intermedio análogo ( $\text{R}^+ = \text{H}$ ) con un ácido libre. En principio, la metodología puede ser utilizada con cualquier alcohol, pero en la práctica está limitada a aquellos alcoholes que pueden ser eliminados del medio de reacción por evaporación selectiva, por ejemplo metanol (Christie, 1993).

Romano y Sorichetti (2011) indican algunas características del biodiesel, tales como:

- Baja toxicidad en comparación con el diesel común
- Al ser quemado sus emisiones se degradan más rápido que el diesel, lo que reduce las consecuencias al ambiente
- Su composición química lo hace más fácil de degradar ante posibles derrames accidentales
- Tiene tasas menores de emisión de contaminantes a la atmósfera, lo que reduce los daños a la salud
- No contiene azufre
- Punto de inflamación alto (mayor a 100°C) lo que lo hace más seguro de transportar
- Puede mezclarse con el combustible fósil en el motor en cualquier proporción ó, usarse solo, con una previa modificación de éste
- Se puede producir a partir de aceite de cocina quemado, grasas animales ó aceites vegetales vírgenes

Es importante conocer las propiedades fisicoquímicas del biodiesel con el objetivo de saber si puede o no sustituir al diésel. En la tabla de la figura 9 se muestran las características con las que debe contar dicho biocombustible respaldadas en las normas **ASTM-D6751-7\*** y **EN14214:2002\*\***.



No.	Propiedad	Estándares Internacionales		
		ASTM D 6751-7*	EN 14214:2002**	Unidades
1	Contenido de calcio y magnesio, combinado	5 máx.	-----	ppm
2	Punto de inflamabilidad	130.0 mín.	120.0 mín.	°C
3	Control de alcohol			
4	Agua y sedimento	0.050 máx.		%volumen
5	Viscosidad cinemática a 40 °C	1.9 – 6.0	5.0 máx.	mm <sup>2</sup> /s
6	Ceniza sulfatada	0.020 máx.	0.020 máx.	%masa
7	Azufre	0.05 máx.	0.001 máx.	%masa
8	Corrosión a la lamina de cobre	No. 3 máx.	No. 1	
9	Número de cetano	47 mín.	51 mín.	
10	Punto de nube	Reportar		°C
11	Residuo de carbón	0.050 máx.	0.30 máx.	%masa
12	Número de acidez	0.50 máx.	0.50 máx.	MgKOH
13	Glicerina libre	0.020 máx.	0.020 máx.	%masa
14	Glicerina total	0.240 máx.	0.250 máx.	%masa
15	Contenido de fósforo	0.001 máx.	0.0001 máx.	%masa
16	Temperatura de destilación, 90% recuperado	360 máx.		°C
17	Contenido de sodio y potasio, combinado	5 máx.	6 máx.	ppm
18	Estabilidad de la oxidación	3 mín.		horas
19	Contenido de éster		96.5 mín.	%(m/m)

FIGURA 9. Tabla con Estándares internacionales de calidad del biodiesel. Fuente: EURO FUEL TECH

\*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL

\*\* EUROPEAN STANDARDS

La principal ventaja en la producción del biodiesel respecto al diesel, es que se requiere de menor consumo de energía a lo largo del todo el ciclo de producción. Así como también durante la combustión del diesel se emiten mayores cantidades de contaminantes a la atmósfera debido a su contenido de azufre. Además, producir diesel requiere de más procesos que van desde la extracción del petróleo y sus respectivas emisiones y consumo de energía, transporte, refinado, transporte y distribución; mientras que en la producción del biocombustible se evita la extracción y transporte de crudo, esto puede implicar ahorros de energía y emisiones de contaminantes de hasta 96% (Ministerio del Medio Ambiente, 2006). Todas estas ventajas se pueden comprobar al hacer un análisis de ciclo de vida (ACV).

---

## 5.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL BIODIESEL (ACV)

---

El impacto ambiental de un producto inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente. Durante la fabricación, las empresas deben evaluar el impacto ambiental que tiene su proceso, además tienen la responsabilidad sobre el impacto que ocasionan las partes involucradas en este hasta que el producto llega al cliente final, (por ejemplo proveedores, distribuidores y consumidores). Esta cadena, que va ‘desde el nacimiento hasta la tumba’ es lo que se denomina *ciclo de vida de un producto* (Romero, 2003).

El ACV es una herramienta que puede proporcionar una evaluación tan detallada como se desee de un proceso para la obtención de un producto o servicio. Dicha evaluación se lleva a cabo tomando en cuenta el flujo de los materiales y su intensidad de uso y de la energía consumida a lo largo de todo el proceso. Tomando en cuenta lo anterior, la herramienta del ACV se asocia a tres conceptos (Giraldi, 2013):

- I) el análisis de flujo de materiales y sus sinergias
- II) la valorización energética
- III) la gestión de residuos

Amaya et al. (2008) hace mención de las cuatro fases que estructuran un ACV basándose en la Norma ISO 14040:

- I) definición del objetivo y el alcance,
- II) análisis de inventario,
- III) evaluación del impacto, e
- IV) interpretación de resultados.

Según la página web de las Normas ISO, la ISO 14040:2006 (2006) describe los principios y el marco para la evaluación del ciclo de vida (ACV) incluyendo los 4 puntos anteriores, pero no describe las técnicas para la evaluación ni tampoco especifica una cierta metodología para las fases individuales de un estudio.

Normalmente se dice que una de las ventajas del biodiesel respecto al diesel es la emisión de contaminantes durante la combustión. Pero dichas ventajas van más allá que eso, ya que producir el biocombustible es menos perjudicial para el medio ambiente y, su ciclo de vida en general también lo es. La consulta bibliográfica de diversos ACV que se haga podría permitir confirmar lo anterior. La principal ventaja es en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que el emitido a la atmosfera por la combustión del biodiesel es el mismo que fue atrapado por las plantas durante su crecimiento. Mientras que el CO<sub>2</sub> emitido por el diesel ha estado millones de años en el subsuelo (petróleo) y, por tanto, no se lleva a cabo un ciclo como en el caso del biocombustible (Gazzoni, 2009).

El ciclo de vida del diesel consiste básicamente un una serie de pasos que van desde la extracción del petróleo crudo hasta el transporte para su venta al usuario final o bien, hasta que es quemado en lo vehículos y se emite en forma de gases. En la tabla 10 se muestran los pasos para la producción del diesel y el porcentaje que cada uno demanda de energía.

<b>Escenario/ proceso</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Producción/extracción de petróleo crudo nacional</b>	47.75
<b>Producción/extracción de petróleo crudo importado</b>	45.00
<b>Transporte de crudo a nivel nacional</b>	0.27
<b>Importación de crudo</b>	1.09
<b>Refinamiento del petróleo crudo</b>	5.38
<b>Transporte del diesel para su comercialización</b>	0.51

FIGURA 10. Tabla con el proceso productivo del diesel. FUENTE NREL (1998)

La parte de la extracción del petróleo nos permite ver qué es donde más recursos energéticos se consumen y, dado que muchos países no tienen una independencia petrolera plena, es necesaria la importación de éste para satisfacer las necesidades energéticas.

El ciclo de vida del biodiesel es completamente diferente ya que no requiere petróleo como materia prima, sin embargo también necesita de consumo de energía a lo largo de toda la cadena productiva. La tabla de la figura 11 y la figura 12 dan un panorama más amplio de su proceso productivo.

En ambos casos se puede ver que la obtención de las materias primas tiene un porcentaje importante de consumo de energía, esto puede ser porque no solo se requiere de la tierra, sino que también de fertilizantes, agua, etc. Sin embargo en la producción del biodiesel el proceso de conversión es el que más requerimiento energético tiene, esto se adjudica a que se lleva a cabo la conversión de los ácidos grasos en metil ésteres y durante el proceso se requiere de un alcohol, un catalizador, lavado del biodiesel, etc.

Escenario/proceso	Porcentaje (%)
Agricultura de las materias primas (granos)	21.8
Transporte de la materia prima	1.09
Molienda del grano y obtención del aceite	25.61
Transporte del aceite	2.31
Conversión del aceite en biodiesel	48.49
Transporte del biodiesel para su comercialización	1.41
<b>Total</b>	<b>100</b>

FIGURA 11. Tabla con proceso productivo del biodiesel. FUENTE: NREL (1998)

En las dos situaciones el transporte de las materias primas y de los combustibles ya terminados no tiene una alta demanda debido a que se transportan en grandes cantidades.

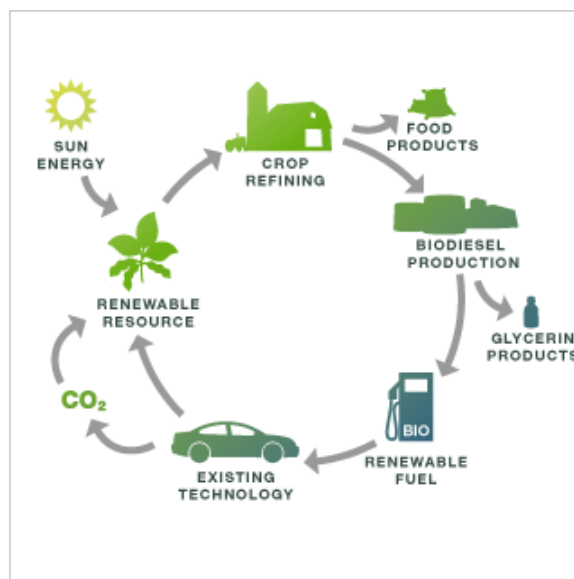


FIGURA 12. Ciclo de vida del biodiesel. FUENTE: [HTTP://ERIKA-BIODIESEL.BLOGSPOT.MX](http://erika-biodiesel.blogspot.mx)

En la figura 13 se realiza una comparación de las emisiones y requerimientos energéticos para la producción de biodiesel y diesel convencional.

Autor/Parámetro	Relación de energía fósil diesel	Relación de energía fósil (MJ/MJ B100)	Relación de energía fósil (MJ/MJ biodiesel)	Ahorro energía en producción y distribución B100 (%)
<b>CIEMAT</b>	0.968	0.259	0.964 (B10)	75
<b>IICA</b>	0.834	0.311	0.980 (B20)	62.71
<b>Ademe (girasol)</b>	0.917	0.316		65.54
<b>Ademe (colza)</b>	0.917	0.334		63.58

FIGURA 13. Tabla con cuadro comparativo de consumo y ahorro de energía en el ciclo de vida del diesel y biodiesel. FUENTE: (CIEMAT, 2007); IICA (2009); ADEME (2002)

Autor/Parámetro	Emisiones CO <sub>2</sub> diesel (%)	Emisiones CO <sub>2</sub> B100 respecto al diesel (%)	Emisiones CO <sub>2</sub> B20 respecto al diesel (%)	Emisiones CO <sub>2</sub> B10 respecto al diesel (%)
<b>CIEMAT</b>	100	-56.45		-5.52
<b>IICA</b>	100	-78.45	-15.66	
<b>Ademe (girasol)</b>	100	-74.65		
<b>Ademe (colza)</b>	100	-70.11		

FIGURA 14. Tabla con cuadro comparativo de las emisiones de co<sub>2</sub> en el ciclo de vida del diesel y biodiesel. Fuente: elaboración propia con datos de (CIEMAT, 2007); IICA (2009); ADEME (2002)

La relación de energía fósil hace referencia a qué tanta energía se requiere para producir una unidad del combustible en cuestión, usualmente MJ. En la tabla de la figura 14 se utiliza esta relación porque los autores utilizan diferentes unidades para expresar los requerimientos energéticos para el ACV. La forma de calcular la relación se expresa en la ecuación 1.

$$\text{Relación energía fósil} = \frac{1 \text{ MJ de biodiesel producido}}{\text{MJ necesarios para producirlo y distribuirlo}}$$

ECUACIÓN 1. Relación de energía fósil. FUENTE: CIEMAT, 2007

Las materias primas para la producción del biodiesel son de vital importancia, ya que se debe tomar en cuenta su disponibilidad, costos, costos y formas de producción y calidad. La higuera se considera una semilla que no es de uso alimenticio, por lo que su uso como materia prima para la síntesis de biodiesel es viable; mientras que el desperdicio del pollo (grasa) no tiene un uso y se dispone de él en rellenos sanitarios.

## 5.6 HIGUERILLA (*RICINUS COMMUNIS*)

---

La higuierilla, (también conocida como ricino, palma de cristo, higuera del infierno, etc.), es una planta oleaginosa que tiene una increíble tolerancia a las diferentes características del suelo, climas cálidos y poco suministro de agua (figura 15). Es cultivada prácticamente en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo, aunque es típica de regiones semiáridas. Es una planta de color verde claro a azul grisáceo, en ocasiones rojiza, que mide hasta 6 metros de alto, su tallo es engrosado y ramificado, sus hojas miden de 10 a 60 cm de diámetro. Los frutos y semillas son una cápsula, con espinas cortas y gruesas (González, 2008; Rico et al., 2011; Hernández et al., 2012).



FIGURA 15. Planta de higuierilla. Fuente: fotografía propia.

La semilla (figura 16) es la parte que nos interesa, ya que es donde se encuentra el aceite (llamado aceite de ricino) para la producción del biodiesel. La semilla por lo regular es de forma ovalada aplastada, redondeada en un extremo y con una excrecencia en el otro llamada carúncula, de superficie brillante y lisa, de color variable que suele ser gris con manchas rojizas y parduzcas de tamaño que va de 0.5 a 1.5 cm de largo; tiene una cubierta exterior dura y quebradiza y otra interior muy fina de color blanquecino, ambas protegen la semilla, la cual consta de un embrión pequeño con dos cotiledones delgados y el albumen es blando, compacto y aceitoso. El contenido de aceite puede variar en la proporción del tegumento, aspecto y de la carúncula y contiene alrededor de un 45 a 50% de aceite y éste a su vez, aproximadamente el 55% de ácido ricinoleico (González, 2008; Robles, 1980; DAFF, 2014).



FIGURA 16. Semilla de la higuierilla. Fuente: <https://rambiocom.wordpress.com/2008/05/12/higuierilla-ricinus-communis/semilla-de-higuierilla/>

Según González (2008), el clima óptimo para el cultivo de la planta es donde hay temperaturas entre 21 y 27°C, soporta la falta de nutrientes en el suelo, tiene un crecimiento rápido, alta reproducción y sus semillas contienen ricina y ricinina, compuestos tóxicos para el ser humano. La ricina es una fitotoxina muy venenosa pero poco efectiva por la vía oral y, la segunda, es un alcaloide. La tabla de la figura 17 da un panorama más amplio sobre las condiciones de cultivo y el rendimiento esperado en la producción.

El clima debe ser libre de heladas pero si pueden soportar un estrés hídrico, tampoco el suelo con baja capacidad de retención de agua es útil para las plantas. A pesar de que en muchas regiones se considera como maleza, durante la preparación del suelo y su crecimiento es necesario tener un adecuado control de las malezas y plagas que la pueden llegar a afectar (Gangaiah, 2008).

Variable	Rendimiento en la producción		
	Alto	Medio	Bajo
<b>Temperatura media anual (°C)</b>	15-30	15-19	T<15
		30-40	T>40
<b>Precipitación anual (mm)</b>	250-1000	1000-1500	<400
			>1500
<b>Altitud (msnm)</b>	0-2100	1800-2500	Altitud>2500
<b>Uso de suelo</b>	Agrícola	Agrícola	Agrícola
<b>Textura de suelo</b>	Media	Media	Fino arcilloso
	grueso	grueso	

FIGURA 17. Tabla con rendimientos en la producción de ricino según las condiciones agroecológicas. Fuente: Rico (2014)

Basándose en la información recabada por Rico y otros autores en 2011, la superficie total destinada a nivel mundial para el cultivo de la higuierilla en 2009 era de 1,473,751 ha con una producción de 1,499,111 toneladas de semillas. En México se estimaba una producción anual de solo 100 toneladas con 500 ha.



Otro informe hecho por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agropecuarias y Pecuarias (INIFAP, 2012) menciona que en nuestro país hay un potencial productivo de higuierilla de 17,914,132 ha, de las cuales tienen un potencial alto 8,001,415 ha y 9,912,717 ha presentan un potencial medio de producción. Sin embargo, según una publicación de la SAGARPA (2015) menciona que para el año 2016 se esperaba llegar a un total de 16,000 ha de siembra y en 2025 a 70,000 ha. La figura 18 muestra la distribución de las zonas con alto, medio y no apto potencial productivo de la planta según el INIFAP; mientras que en la figura 19 se pueden apreciar cuales son las 5 entidades con mayor capacidad productiva.

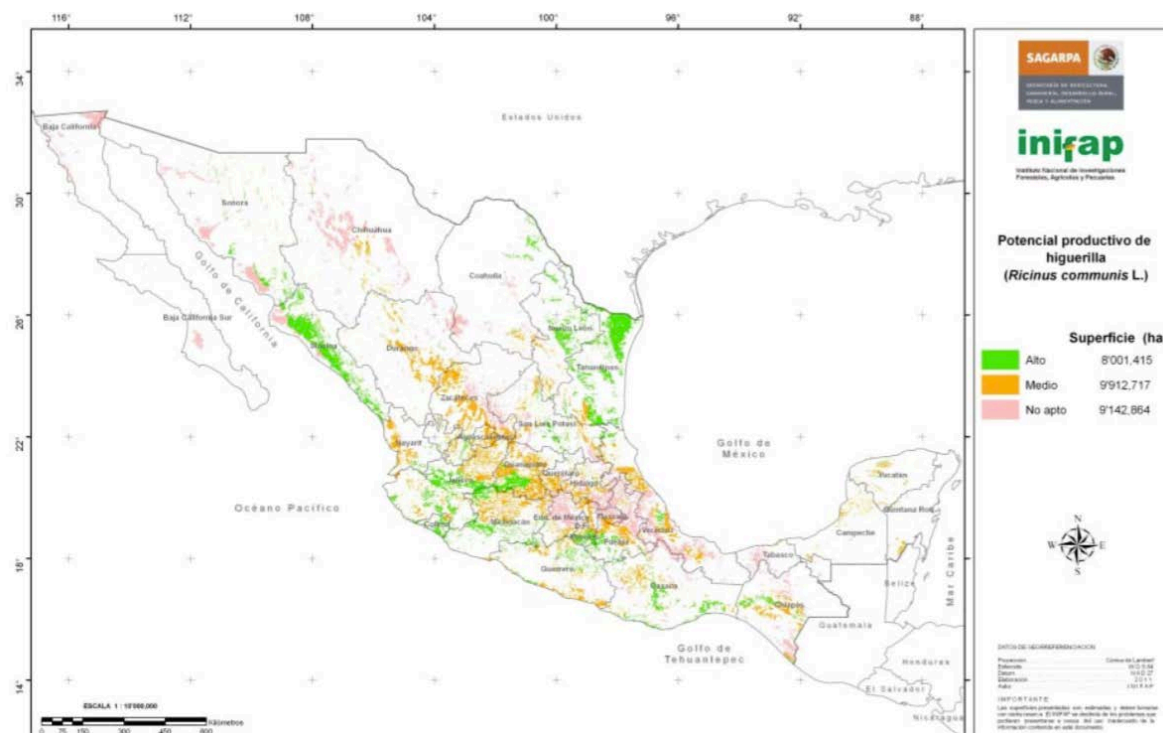


FIGURA 18. Distribución de zonas con potencial productivo en México. Fuente: INIFAP, 2012

Estado	Potencial productivo (ha)	
	Alto	Medio
<b>Guanajuato</b>	381,307	998,148
<b>Jalisco</b>	904,922	844,811
<b>Michoacán</b>	636,652	769,439
<b>Sinaloa</b>	1,426,786	24,673
<b>Tamaulipas</b>	1,668,103	155,848

FIGURA 19. Tabla con principales estados con mayor capacidad productiva de higuierilla. Fuente: INIFAP, 2012



La principal desventaja del cultivo de la higuera es que favorece la erosión del suelo, principalmente las plantas que tienen un crecimiento medio y alto; esto es porque la distancia que se deja entre cada semilla en el proceso de plantación es grande (1 metro aproximadamente) y en las primeras semanas no protege el suelo del contacto directo del agua de lluvia. Las principales formas de erosión del suelo causadas por la higuera son (Soares et al., 2007):

- La erosión causada por la lluvia, ya que se pierden hasta 41.5 ton/ha de suelo y 12% de agua de lluvia
- Agotamiento químico provocado por la cantidad de nutrientes que la planta extrae del suelo y que no retornan.

El mismo texto argumenta que para evitar o reducir la erosión del suelo por la higuera se pueden tomar las siguientes acciones:

- Sembrar en curvas a nivel
- Preparar el suelo siguiendo las curvas
- Hacer la rotación de cultivos todos los años
- Planificar el trazado de calles y surcos, evitando largas pendientes.

El aceite de ricino es de un color amarillo pálido, viscoso, de un olor débil y sabor dulce al principio pero después agrio. Una vez extraído de las semillas tiene diversos usos a nivel industrial. Se usa en la industria de los lubricantes de aviones, farmacéutica, pinturas y barnices, explosivos, aislantes, cosméticos, plásticos, etc. es decir, los principales consumidores de dicha materia prima es la industria química. En los últimos años se le ha dado un uso adicional, que es la producción de biodiesel y tal industria sería capaz de absorber la totalidad de la producción si llega a tener un crecimiento importante debido a sus propiedades (Condorchem Envitech, 2013).

---

#### 5.6.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE DE RICINO

---

Por otra parte, una de las principales características del aceite de ricino es que posee la viscosidad más alta de todos los aceites vegetales, tiene una alta densidad y es miscible con el alcohol, cosa que no ocurre con otros aceites del mismo origen (Valderrama et al., 1994). En la figura 20 se observan algunas propiedades fisicoquímicas del aceite de ricino según tres diferentes publicaciones.

Parámetro	Valor		
	Salimon et al., 2010	Panwar et al., 2010	Valderrama, 1994
<b>Viscosidad cinemática (cP)</b>	332	217.75 a 38°C	950 a 200°C
<b>Densidad (g/ml)</b>	0.968	0.960	0.938
<b>Poder calorífico (MJ/Kg)</b>	-	36.20	-
<b>Punto de inflamación (°C)</b>	-	317	-
<b>Índice de acidez (mgKOH/g)</b>	4.9	1.642	
<b>Índice de saponificación (mg/g)</b>	182.9	-	175 - 187
<b>Índice de yodo (mg/g)</b>	84.5	-	82 - 88
<b>Índice de refracción (mg/g)</b>	1.47	-	1.47

FIGURA 20. TABLA CON Propiedades fisicoquímicas del aceite de ricino. Fuente: Valderrama (1994); Panwar (2010); Salimon (2010)

El contenido de ácidos grasos en el aceite de ricino se pueden ver en la figura 21 basándose en la información proporcionada por Valderrama, Mery & Aravena (1994); Berman et al, (2011).

Ácido graso	Porcentaje contenido (%)
<b>Palmítico</b>	0.9 - 1.2
<b>Esteárico</b>	0.7 - 1.2
<b>Oleico</b>	3.2 - 3.3
<b>Linoleico</b>	3.4 - 4.6
<b>Linolénico</b>	0.2 – 0.5
<b>Ricinoleico</b>	89 – 90
<b>Eicosenoico</b>	0.29
<b>Dihidroxiesteárico</b>	1.0 – 1.4

FIGURA 21. Contenido de ácidos grasos en el aceite de ricino. Fuente: Valderrama (1994); Panwar (2010); SALIMON (2010)

## 5.7 PRODUCCIÓN AVÍCOLA EN MÉXICO

---

Durante la búsqueda de materias primas para la elaboración de este proyecto se tomó en consideración que la grasa de pollo cruda sería un opción viable debido a que es un desperdicio de las pollerías, va a rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, sirviendo de alimento a la fauna nociva y, por tanto, estimulando su desarrollo. Lo que se pretende que la grasa de pollo tenga un valor agregado y evitar que ocupe espacio en los rellenos.



FIGURA 22. Pollos de engorde. Fuente: [http://www.avipunta.com/antibioticos\\_avipunta\\_2015.htm](http://www.avipunta.com/antibioticos_avipunta_2015.htm)

El pollo es la gallina o el gallo joven, sacrificados entre las 5 y las 16 semanas de vida, con un peso entre 1 y 3 kg. En función de la alimentación, el pollo tendrá carne tierna, blanca o ligeramente amarillenta. Sin embargo en América Latina, México y algunas regiones de Estados Unidos se cree que si la piel es amarilla, el pollo es de mejor calidad, desconociendo el consumidor que muchas veces puede ser pintada con colorantes vegetales (Castañeda, Braña & Martínez, 2013; MAGRAMA, 2016). En las figuras 22 y 23 se puede notar a pollos en granjas.



FIGURA 23. Pollos con edad suficiente para su sacrificio. Fuente: <http://negociorentablehoy.com/crianza-de-pollos-engorde/>

Existen dos tipos de crianza del pollo: el industrializado y el de corral. El industrial es el que crece en forma intensiva en granjas industriales, por lo regular pertenecientes a grandes corporaciones; mientras que el de corral vive en relativa libertad, se alimenta con granos y tiene un mayor costo. Se considera que la manipulación de las aves de corral puede tener una mayor exposición a las enfermedades de los animales, mientras que en criaderos industriales se utilizan todos los equipos y protocolos necesarios para minimizar la contaminación (FAO, 2013; MAGRAMA, 2016).

El consumo de la carne de pollo se fundamenta en que es un alimento muy completo, ya que contiene mucha proteína de alta calidad, vitaminas, minerales, entre otros componentes y la cantidad de grasa es mínima comparada con otras carnes como la vacuna y porcina. Se considera como carne blanca por su menor contenido de hierro (0,7 mg en comparación con 2 mg/100 g de carne de vacuno), no contiene grasas trans (uno de los posibles factores causantes de enfermedades coronarias), a diferencia de las grandes cantidades presentes en la carne de vacuno y cordero. Debido a estos valores es la carne preferida por las personas que cuidan su peso y aquellos que deben restringir su consumo en grasa. Esta carne forma parte de una dieta balanceada en la que existe una inmensa variedad de alimentos, necesarios para llevar una vida equilibrada y saludable. Además de las ventajas ya mencionadas, su carne es barata en comparación con la roja, fácil y rápida de preparar y de servir (USAID, 2010; Castañeda, Braña & Martínez, 2013; FAO, 2013). En la tabla de la figura 24 se detallan los principales nutrientes contenidos en la carne de pollo.

<b>Nutrientes</b>	<b>Cantidad por cada 100 gr de carne</b>
<b>Fósforo</b>	200 mg
<b>Calcio</b>	12 mg
<b>Ácido fólico</b>	115 mg
<b>Vitamina A</b>	65 UI
<b>Vitamina B1</b>	0.08 mg
<b>Vitamina C</b>	3 mg
<b>Selenio</b>	8.6-41 µg
<b>Proteínas</b>	16-18 gr
<b>Ácidos grasos monoinsaturados</b>	4.37
<b>Ácidos grasos poliinsaturados</b>	1.82 g

FIGURA 24. Tabla con nutrientes contenidos en el pollo. Fuente: elaboración propia con base en consulta bibliográfica

Una ventaja adicional e importante es que la mayoría de la grasa del animal se encuentra en la piel, por lo que al retirarla se reduce el consumo de esta considerablemente. Un pollo de aproximadamente 2 kg tiene un porcentaje de grasa del 21.7%. Cabe mencionar que el incremento de la grasa y del peso corporal van a la par. Las condiciones de temperatura, espacio y alimentación van cambiando según la edad del animal, las cuales deben ser las adecuadas a fin de garantizar una buena salud. Por otra parte, el transporte al rastro y su manejo dentro de él debe cumplir con ciertas normas con el objetivo de cumplir con la inocuidad y una carne apta para consumo humano (Quintana & Rodríguez, 2011; Castañeda, Braña & Martínez, 2013).

De acuerdo con estimaciones de la FAO, en 2015 se pronosticaba una producción de pollo a nivel mundial de 87.4 millones de toneladas, cifras superiores a las del 2013 y 2014, años en los cuales se produjeron 84.5 y 86 millones de toneladas, respectivamente. Mientras que el consumo de carne de pollo para el 2015 se esperaba de 85.1 millones de toneladas a nivel global, siendo EU el mayor consumidor con 14.4 millones de toneladas (Gerón, 2015).

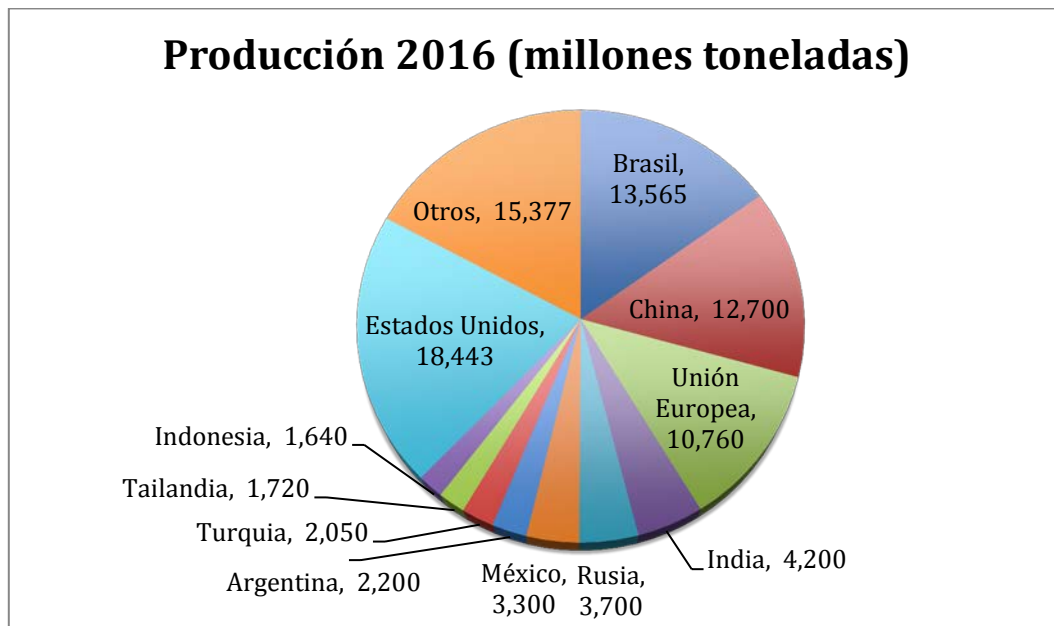


FIGURA 25. Gráfica de producción mundial de pollo estimada en abril para 2016. Fuente: elaboración propia con datos de USDA (2016)

Un informe del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2016) hace mención de la producción, consumo y comercio de pollo a nivel mundial durante el periodo 2012-abril de 2016, ubicando a Estados Unidos, China y Brasil como los principales productores respectivamente. En las figuras 25 y 26 se aprecian los principales productores y consumidores hasta abril del 2016.

## Porcentaje de consumo por país en 2016 (%)

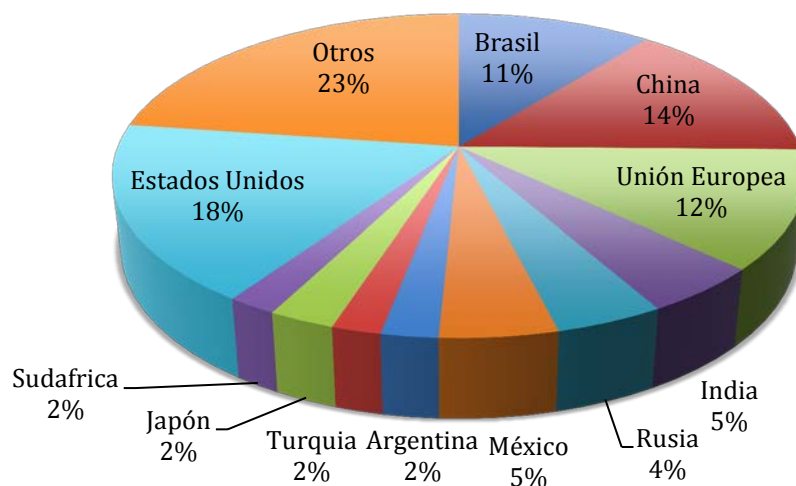


FIGURA 26. Gráfica de porcentaje de consumo por país estimado en abril para el 2016. Fuente: elaboración propia con datos de USDA (2016)

Según datos de la Unión Nacional de Avicultores (UNA, 2016), en 2014 en México se produjeron aproximadamente 3,025,133 toneladas de pollo y se tiene una tendencia a la alza con una producción en 2015 de 3,175,010 toneladas. El aumento en la producción deriva de la demanda en el mercado mexicano, ya que en 2014 el consumo per cápita de pollo fue de 22.0 kg y en 2015 de 22.3 kg. Según la fuente, el valor de la producción en 2015 fue de \$78,428 millones de pesos.

De acuerdo con la información consultada, los principales estados productores de pollo en el país son Aguascalientes y Querétaro con el 11% cada uno. En la figura 27 se puede observar la distribución de producción avícola en nuestro país.

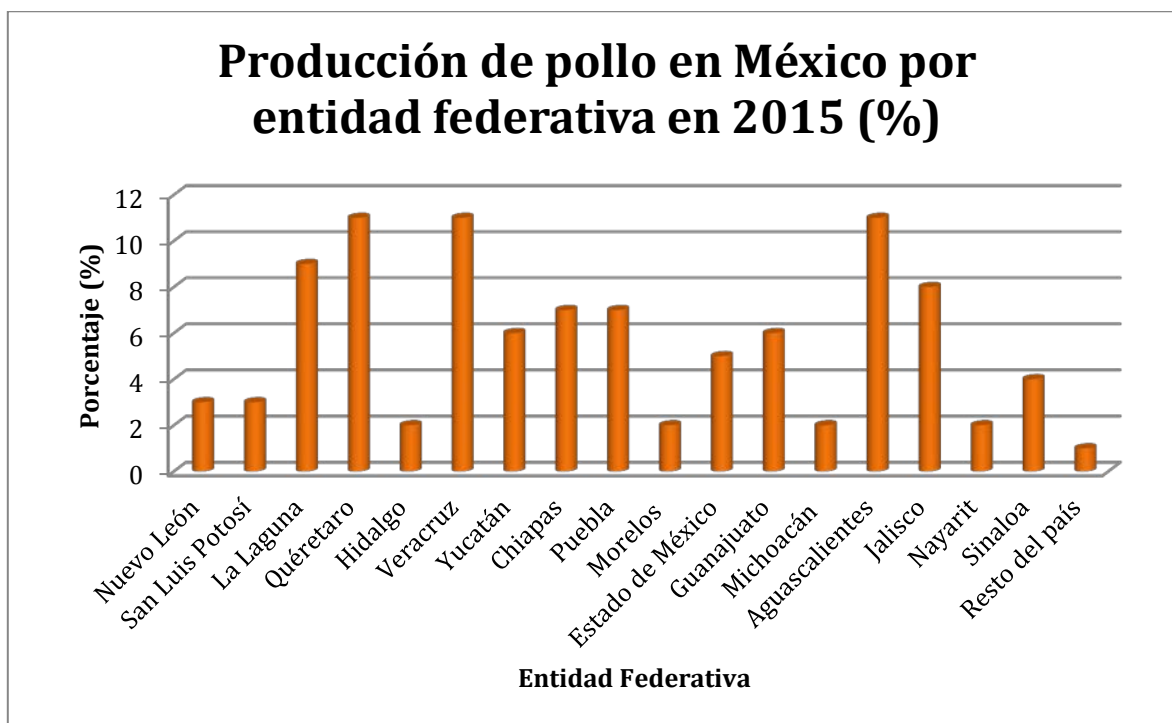


FIGURA 27. Gráfica de producción por estados (en porcentaje) en México en 2015. Fuente: UMA (2016)

#### 5.7.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LA GRASA DE POLLO.

En la figura 28 se pueden ver algunas propiedades fisicoquímicas de la grasa de pollo según Morales (2011).

Parámetro	Valor
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	59.20
Densidad (g/ml)	0.932
Poder calorífico (MJ/Kg)	39.407
Índice de acidez (mgKOH/g)	26.89
Índice de saponificación (mg/g)	225.8

FIGURA 28. Tabla de propiedades fisicoquímicas de la grasa de pollo. Fuente: Morales (2011).



Los ácidos grasos que contiene la grasa de pollo según Benjumea, Agudelo y Ríos (2009) se pueden observar en la tabla de la figura 29.

Ácido graso	Porcentaje contenido (%)
<b>Mirístico</b>	1.3
<b>Miristoleico</b>	0.2
<b>Palmítico</b>	23.2
<b>Palmitoleico</b>	6.5
<b>Heptadecanoico</b>	0.3
<b>Esteárico</b>	6.4
<b>Oleico</b>	41.6
<b>Linoleico</b>	18.9
<b>Linolénico</b>	1.3

FIGURA 29. Tabla de ácidos grasos presentes en la grasa de pollo. Fuente: Benjumea, Agudelo & Ríos (2009).

En el proceso productivo del biodiesel, además de las materias primas, es necesario el uso de catalizadores que ayuden a que el proceso sea rápido. Los catalizadores pueden ser homogéneos (del mismo estado de agregación que los demás reactivos) o heterogéneos (sólidos). Entre los más utilizados están el hidróxido o metóxido de sodio, sin embargo, se han usado una gran variedad de catalizadores en diversas investigaciones con el fin de obtener los más altos rendimientos y más bajos costos posibles.

## 5.8 CATALIZADORES

En muchos mecanismos de reacción existe una etapa elemental, con una velocidad menor que la del resto de etapas, que limita la velocidad global de la reacción. Para conseguir que la reacción transcurra a mayor velocidad una opción sería aumentar la temperatura; sin embargo, esto podría hacer disminuir la concentración en el equilibrio del producto que deseamos, o bien dar lugar a reacciones secundarias que consuman el producto deseado, o que generen impurezas. Para evitar todo esto suele ser útil el empleo de un catalizador (Díaz, 2010).

Un catalizador es una sustancia que aumenta la velocidad de una reacción química sin consumirse en ella, además de que puede recuperarse sin haber sufrido cambio alguno al final de la reacción. Existen los catalizadores homogéneos y heterogéneos; los primeros se encuentran en la misma fase que los reactivos, mientras que los otros están en diferentes fases que los reactivos (Mortimer, 1983).



Otra definición de catalizador, aceptada oficialmente por la IUPAC, es “aquella sustancia que incrementa la velocidad de la reacción sin alterar la energía libre de Gibbs estándar de la misma; el proceso se denomina catálisis y la reacción en que está involucrado un catalizador se denomina reacción catalizada” (Díaz, 2010). Mientras que los catalizadores pueden afectar en gran medida la velocidad de una reacción, la posición del equilibrio entre la composición de reactivos y productos sigue estando determinado únicamente por la termodinámica (Davis & Davis, 2003).

La catálisis homogénea se refiere a un sistema catalítico en el que los sustratos para una reacción y los componentes del catalizador se ponen juntos en una fase, más a menudo la fase líquida; se tiene un acceso más fácil al mecanismo de reacción y por consecuencia se puede dominar mejor el proceso catalítico correspondiente, además tienen la característica de que es más difícil su envenenamiento. Sin embargo la principal desventaja es la dificultad para separar el catalizador y el medio reactivo, lo que representa un aumento en los costos de producción. La contribución del proceso catalítico homogéneo en la industria química es significativamente menor en comparación con heterogéneo, es sólo alrededor del 17 al 20% (Van Leeuwen, 2006; NPTEL, 2014).

La catálisis juega un papel clave en la producción industrial de combustibles líquidos y productos químicos a granel. La mayoría de los procesos en la industria química utiliza las conversiones catalíticas y la síntesis de productos químicos finos utiliza una gran variedad de catalizadores homogéneos sofisticados. Para los procesos de aceites, en general los catalizadores heterogéneos son los preferidos, con una excepción, la reacción de alquilación para la que se utilizan catalizadores ácidos líquidos. Para la conversión de los productos petroquímicos se puede disponer de ambos tipos de catalizadores. Los catalizadores homogéneos son las moléculas simples o iones tales como  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , así como moléculas complejas tales como complejos organometálicos, compuestos macrocíclicos y moléculas de enzima de gran tamaño (Van Leeuwen, 2006; NPTEL, 2014).

La catálisis heterogénea es cuando el catalizador se encuentra en la fase diferente que los reactivos (por lo regular en fase sólida). Una reacción catalítica de este tipo implica la adsorción de los reactivos de una fase fluida sobre una superficie sólida, reacción en la superficie de las especies adsorbidas, y desorción de los productos en la fase fluida. Claramente, la presencia de un catalizador proporciona una secuencia alternativa de pasos elementales para llevar a cabo la reacción química deseada (Davis & Davis, 2003)

Los catalizadores heterogéneos están compuestos normalmente por una fase activa o catalizador propiamente dicho y un soporte que le puede proporcionar una elevada área superficial sobre la que se dispersa la fase activa. En muchos casos existen otros compuestos superficiales, conocidos como promotores, que mejoran las características del catalizador ya sea mejorando la dispersión de este (promotores estructurales) o bien aumentando la selectividad y/o actividad (promotores químicos). Los soportes a menudo se consideran inertes aun que no es imperativo ya que también pueden interferir en el proceso catalítico. Las fases activas más usadas son metales nobles y óxidos de metales de transición. Los primeros suelen ser muy efectivos y caros y se desactivan con relativa facilidad mientras que los segundos presentan una menor efectividad, pero se desactivan menos y son más baratos. Entre los soportes más usados destacan las alúminas, sílices, zeolitas y carbones activos; en general, deben ser materiales inertes química y térmicamente y que aporten una alta porosidad al catalizador resultante (Jiménez et al., 2008; Deutschmann et al, 2009).

En otras palabras, el agente activo es la sustancia que produce la aceleración de la reacción química; el soporte es una sustancia muy poco activa de gran superficie específica y porosidad, cuyo objetivo es extender el área del agente activo. En algunos casos se usan los promotores, que son sustancias que se agregan al catalizador con el fin de mejorar sus cualidades (Droguett, 1983; Jiménez et al., 2008).

Para la selección de un catalizador se debe tener en cuenta un conjunto de propiedades fundamentales, debido a la importancia que adquieren durante el desarrollo de una reacción. Estas propiedades pueden dividirse en dos grupos que involucran propiedades fisicoquímicas y mecánicas según Ocsachoque (2012) (figura 30).

Propiedades fisicoquímicas	Propiedades mecánicas
Actividad	Resistencia a la abrasión
Selectividad	Resistencia mecánica
Estabilidad	Morfología
Regeneración	

FIGURA 30. Tabla de propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los catalizadores. Fuente Ocsachoque (2012).

En el libro “Elementos de catálisis heterogénea” Sergio Droguett (1983) explica el significado de las principales propiedades de los catalizadores sólidos:

- **Actividad:** Se define como la propiedad de aumentar la velocidad de la reacción con respecto a la manifestada sin catalizador, en las mismas condiciones de temperatura, presión, concentración, etc. En términos aplicados, es la capacidad de generar en un tiempo razonable una cantidad comercialmente importante de productos por cantidad de catalizador.
- **Selectividad:** Es la propiedad del catalizador para favorecer el mayor rendimiento de síntesis o degradabilidad de determinada especie entre un conjunto de productos de la reacción. Algunos reactivos, especialmente los de naturaleza orgánica, dan origen a reacciones paralelas o sucesivas que permiten obtener una mezcla de productos cuya separación no siempre es fácil o económica. Un catalizador de alta selectividad da un buen rendimiento del producto de interés y reduce la formación de especies secundarias.
- **Estabilidad:** Es la propiedad del catalizador de mantener su actividad catalítica y su selectividad durante un tiempo. En general, el catalizador pierde eficacia con el tiempo debido a cambios físicos o químicos ocurridos durante la reacción. La estabilidad puede expresarse también como el tiempo de vida útil del catalizador. Un buen catalizador debe mantenerse inalterable por un largo tiempo de funcionamiento.

Efectividad	Catalizadores homogéneos	Catalizadores heterogéneos
<b>Centros activos</b>	Todos los átomos	Todos los átomos superficiales
<b>Selectividad</b>	Alta	Baja
<b>Condiciones de reacción</b>	Suaves	Agresivas
<b>Facilidad de uso</b>	Limitado	Extenso
Propiedades catalíticas		
<b>Estructura</b>	Definida	Indefinida
<b>Riesgo de modificación</b>	Alto	Bajo
<b>Estabilidad térmica</b>	Baja	Alta
Propiedades físicas		
<b>Separación de catalizadores</b>	Complicada	Fácil
<b>Reciclado del catalizador</b>	Posible	Fácil
<b>Costos por pérdidas de catalizador</b>	Alto	Bajo

FIGURA 31. Tabla de diferencias entre catalizadores homogéneos y heterogéneos. FUENTE PARRA, 2012.

Un catalizador puede perder su estabilidad por diferentes causas, como es el envejecimiento, se ensucia o se envenena con otras sustancias ajenas. En la tabla de la figura 31 se pueden apreciar las diferencias entre catalizadores homogéneos y heterogéneos.

#### 5.8.1 CATALIZADORES DE ZIRCONIA SULFATADA.

La zirconia sulfatada posee características favorables para ser utilizada como catalizador, tales como la estabilidad estructural, la fuerte acidez que presenta y la actividad catalítica que ha mostrado para ciertas reacciones como la reacción de Biginelli, la síntesis de formamidina, la acilación de compuestos aromáticos, síntesis de coumarinas, reacciones tipo Mannich, entre otras (Reddy & Patil, 2009).

Dicho catalizador es un sólido ácido potencial con ambos tipos de sitios ácidos Bronsted y Lewis presentes en su superficie. Las especies de sulfato se unen con un átomo de zirconio como quelante bidentado y en presencia de una molécula de agua, el grupo sulfato se comporta como ión y genera los sitios ácidos Bronsted en la superficie. La desorción de la molécula de agua convierte el sulfato iónico unido covalentemente a grupo sulfato, que genera los sitios ácidos de Lewis en el átomo de zirconio mediante la reducción de la densidad electrónica en el átomo de zirconio (Kumar, 2007; Sartori G. & Maggi R., 2009).

El óxido de zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ) ha atraído la atención de un gran número de investigadores como soporte interesante en sistemas catalíticos heterogéneos. La actividad y selectividad del  $\text{ZrO}_2$  está fuertemente condicionada por el método de preparación, las temperaturas de tratamiento térmico y por la adición de agentes dopantes o modificadores de estructura. Se sabe que la adición de iones tales como sulfatos, fosfatos y/o boratos al hidróxido de zirconio ( $\text{Zr}(\text{OH})_4$ ) da como resultado óxidos de zirconio con fuerte acidez y excelentes propiedades catalíticas en reacciones de alquilación e isomerización de parafinas ligeras. De entre ellos, el óxido de zirconia sulfatada es el soporte catalítico de mayor fuerza ácida, fluctuando esta alrededor de  $\text{H}^0 = -16.04$ , superando la del ácido sulfúrico al 100%, la cual presenta un valor de  $\text{H}^0 \leq -11.93$  (Silva et al, 2005; Fan et al, 2009; Hernández et al., 2012).

La zirconia sulfatada se considera un catalizador súper ácido, pero su actividad y los parámetros que afectan sus propiedades estructurales están ligados directamente con el método de síntesis. Existen diversos métodos para la síntesis del catalizador, pero según la literatura el más efectivo es el de sol-gel. En este método se debe cuidar los parámetros para la síntesis como la cantidad de precursores y tipo, la forma de sulfatación, secado y calcinación, entre otros; ya que todo esto va a influir directamente en las propiedades del material (Tichit, et al, 1996; Yadav & Nair, 1999; Kumar, 2007).

El método de sol-gel es un método con el cual se pueden sintetizar nano-materiales mejorando sus propiedades fisicoquímicas, como una alta porosidad y superficie de contacto (área superficial) (Livage et al, 1988; Kumar, 2007). Brinker & Scherer (1990) mencionan que básicamente el proceso de síntesis consiste en dos partes, que son la hidrólisis del precursor en forma de pequeñas partículas en un medio disolvente (sol); la formación del gel a partir de la condensación de las partículas resultantes del sol en la formación del óxido.

Según Rubio et al. (2003) el catalizador  $\text{ZrO}_2/\text{SO}_4^{2-}$  presenta una estructura tetragonal cuando se calcina a  $600^\circ\text{C}$  según datos obtenidos de análisis de rayos X. El análisis por microscopía electrónica de barrido arroja datos de un material que se aglomera para formar cúmulos que pueden ser de hasta 10 micras.

La principal desventaja del  $\text{ZrO}_2/\text{SO}_4^{2-}$  la representa su limitada estabilidad térmica, ya que los iones sulfato son parcialmente removidos como  $\text{SO}_x$  cuando los materiales son calcinados a altas temperaturas ( $> 600^\circ\text{C}$ ), debido a esto, el material pierde acidez y por ende disminuye su actividad catalítica. Por otra parte puede mencionarse la generación de ácido sulfúrico para aquellas reacciones con formación de agua en el medio de reacción, el que a altas temperaturas, da lugar a la formación de agentes contaminantes. Sin embargo, estos problemas son limitados debido a que la mayoría de las reacciones en síntesis orgánica fase líquida, son llevadas a cabo a temperaturas moderadas bajo atmósfera inerte ( $\text{N}_2$  o  $\text{Ar}$ ) donde la posibilidad de pérdida de compuestos azufrados o la transformación de fase de la zirconia y el proceso de sinterización son muy bajas (Yadav y Nair, 1999).

---

## 5.8.2 CATALIZADORES DE ALÚMINA.

---

Entre los soportes empleados en catálisis heterogénea la alúmina es el más ampliamente usado debido a su bajo costo, la estabilidad de su estructura y principalmente porque puede prepararse con una amplia gama de propiedades texturales. Estos materiales son generalmente preparados por deshidratación de diversos hidróxidos de aluminio; si el hidróxido es un gel, este se convierte fácilmente a su forma cristalina por calentamiento y/o envejecimiento. Existen diferentes fases cristalinas de las alúminas. Las más importantes en la catálisis heterogénea son la gamma por su estabilidad y la theta por su acidez. La alúmina es anfótera es decir puede actuar como ácido

en medio básico o como base en medio ácido. Además, su punto de fusión es ligeramente superior a los 2000°C, característica deseable en un soporte, lo que repercute en una mayor estabilidad térmica (Solís, 2011).

Según Padmanabhan y Eastburn (1972); Mamchik et al. (1998) y Solís (2011) los principales usos de la alúmina en la catálisis heterogénea son:

- Como soporte en catalizadores monometálicos, en los que la alúmina no interviene directamente en el mecanismo del proceso catalítico. La fase catalítica se constituye por metales de transición depositados en gamma alúmina o theta alúmina. El papel de la alúmina es diluir y dispersar homogéneamente los metales así como estabilizar la dispersión metálica contra la aglomeración y la sinterización. Esto es de utilidad en los convertidores catalíticos empleados en autos o en la reducción selectiva de NOx.
- Como catalizador activo, ya que la alúmina posee propiedades adsorbentes y es capaz de activar ciertos enlaces tales como: hidrógeno-hidrógeno, carbono-hidrógeno, y carbono-carbono. La isomerización esquelética de alquenos, y la deshidratación de alcoholes a éteres o alquenos son algunos ejemplos donde la alúmina tiene aplicación.
- En catalizadores bifuncionales (co-catalizador) en los cuales los sitios de la fase metálica activa y sitios del soporte se requieren para el mecanismo de reacciones catalíticas.

Una de las ventajas de la alúmina es que no se reduce con hidrógeno y que aunado a su alta temperatura de fusión permite la activación de la fase metálica de los catalizadores usando hidrógeno a altas temperaturas. La actividad y acidez máxima de estos materiales se obtiene a temperaturas de 400-700 °C, en este intervalo de temperaturas existe un balance entre los sitios Brönsted y Lewis. Las alúminas requieren de cierta cantidad de agua en su estructura en forma de hidróxidos para ser más eficientes catalíticamente (Solís, 2001).

## 6 ESTADO DEL ARTE

---

La historia de los biocombustibles inicia en la década de 1890 cuando el inventor Rudolph Diesel invento el motor que hoy lleva su nombre, este motor se ha convertido en una excelente opción por el poder, confiabilidad y alta economía de combustible en todo el mundo. Los primeros experimentos sobre los combustibles de aceite vegetal, hechos por el gobierno francés y el propio Dr. Diesel indicaron que los aceites vegetales puros podrían alimentar los motores diesel utilizados para la agricultura en zonas remotas del mundo, donde no estaba disponible en aquel entonces el petróleo. (Pacific Biodiesel, 2015).

Debido a la amplia disponibilidad y bajo costo del diesel de petróleo, los combustibles a base de aceite vegetal ganaron poca atención. La Segunda Guerra Mundial y la crisis del petróleo de la década de 1970 motivaron un pequeño interés en el uso de aceites vegetales para alimentar los motores diesel. Desafortunadamente, los diseños de motores diesel más nuevos no podían usarse con aceites vegetales tradicionales, debido a la mucho mayor viscosidad de estos en comparación con el diesel tradicional. Fue entonces que un inventor belga en 1973 propuso por primera vez el uso de la transesterificación para convertir los aceites vegetales en ésteres de ácidos grasos. En la década de 1980 la preocupación por el medio ambiente y la seguridad energética motivaron el uso de energías alternas de bajo costo y alta eficiencia (Pacific Biodiesel, 2015).

Shrirame, Panwar, Bamniya, hacen un estudio en 2011 en el cual realizan un análisis sobre las ventajas del biodiesel en el ambiente y en países en vías de desarrollo, principalmente en la India. Entre las ventajas que mencionan están:

- Es biodegradable y no tóxico
- Puede ser utilizado solo o mezclado con diesel común
- El 10% de su peso es oxígeno y no contiene azufre.

Para la producción de biodiesel se pueden usar diversas materias primas, es decir, aceites vegetales o grasas animales, ya sean vírgenes o quemados. Liu, Wen y Cui (2015) mencionan que se obtiene un rendimiento de 92% en la obtención de biodiesel usando como materia prima aceite de canola. Argumentan que las condiciones óptimas para realizar la transesterificación son una relación del 8% en peso de catalizador, relación molar aceite/alcohol de 7:1, tiempo de reacción de 6 horas y temperatura de 120°C.

Arteaga et al, (2010) investigan la producción de biodiesel usando grasa de pollo; previo a la síntesis de este determinan que la composición de ácidos grasos en la grasa es linoleico 20.6%, Oleico 42.5%, Palmítico 21.5%, Esteárico 7.6%, Linolénico 1.8% y otros 6.1%. Se concluye que las mejores condiciones para la obtención del biocombustible son entre 50 y 70°C, tiempo entre 60 y 120 minutos obteniendo un rendimiento del 94.5% con un poder calorífico de 40.2 MJ/Kg. Cabe mencionar que en este caso la catálisis fue homogénea con ácido sulfúrico como catalizador y metanol como alcohol.

Por otra parte, además de evaluar el rendimiento de las reacciones para la producción de biodiesel con las diversas materias primas y variables, es importante saber el papel que desempeñan los diferentes catalizadores usados, con el fin de entender si estos ayudan a obtener los productos deseados así como sus propiedades que permiten se lleven a cabo los procesos de conversión. Un ejemplo de este tipo de análisis lo detallan Banerjee, Bhunia & Bhaumik (2015). Llevaron a cabo la síntesis de zirconia sulfatada por un método hidrotérmico y la calcinan a 823K. Los diferentes análisis que le hace al material sintetizado son difracción de rayos X (XRD); microscopia electrónica de transmisión de ultra alta definición (UHR-TEM); microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM); espectroscopia infrarroja (IR); fisisorción de nitrógeno; entre otros más.

Según detallan los autores, el material cuenta con una mezcla de fases monoclinicas tetragonales en las partículas de  $ZrO_2$ ; los análisis SE-FEM indican que el catalizador está compuesto por partículas esféricas; los resultados de la fisisorción de nitrógeno muestran que el área superficial fue de  $162 \text{ m}^2/\text{g}$  con tamaño de los nanocristales entre 3.77 y 3.2nm. Por último, concluyen que la zirconia sulfatada es muy eficiente y reutilizable para la síntesis de biodiesel; ya que después de volver a usarla en 5 reacciones diferentes, se siguió teniendo un alto porcentaje de conversión.

La obtención de biodiesel también puede hacerse con otro tipo de materiales (catalizadores). Tal es el caso de Baskar y Soumiya (2016) quienes utilizaron un nanocatalizador de hierro (II) dopado con óxido de zinc. La caracterización también consistió en XDR, SEM, microscopía de fuerza atómica (AFM), espectrometría infrarroja (FTIR) y al producto de la transesterificación se le realizó cromatografía de gases. El catalizador se pudo volver a usar durante 4 reacciones más con rendimientos cercanos al 90% y 87% en el quinto. Los resultados del SEM muestran que las partículas tienen forma esférica y no hubo aglomeraciones de estas. El porcentaje óptimo de conversión fue cuando se agregó el 14% en peso del catalizador, una relación molar metanol/aceite de ricino 12:1, temperatura de reacción  $55^\circ\text{C}$  y 55 minutos con un 90% de eficiencia.

En algunos estudios se ha utilizado pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ) siendo un catalizador que tiene su principal aplicación en la producción de ácido sulfúrico. Pero en la investigación de Almeida y otros autores publicada en 2016 hacen mención que se pueden tener rendimientos de conversión hasta del 91% en un periodo de reacción de 6 horas utilizando este catalizador. En la experimentación se hizo la comparación con grasa de pollo (rendimiento entre 90 y 91%), aceite usado (89% de rendimiento) y soya (89 y 90% de rendimiento). También se llega a la conclusión de que el rendimiento se ve afectado por el tiempo de reacción variando entre 48 y 57% en un lapso de 2 a 3 horas y aumentando considerablemente después de la cuarta hora.

Ríos y otros autores publican una investigación (2009) en la cual utilizan aceite de palma y catalizadores heterogéneos, comparando el rendimiento y pureza del producto final con catalizadores convencionales homogéneos. La relación de catalizador que usaron fue de 0.7% para los convencionales (NaOH y KOH) y 3.7% para otros como  $Na_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$  calcinado y  $KOH/\alpha-Al_2O_3$  calcinado. La relación molar de alcohol y aceite de palma fue entre 6:1 y 12:1.

En el artículo "Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content" (Encinar et al., 2011) explican que es posible obtener biodiesel a partir de grasas animales con rendimientos entre el 89 y 97% dependiendo del procedimiento usado. También se menciona que dicho biocombustible puede cumplir con los estándares de calidad estipulados en algunas normas europeas en cuanto a propiedades fisicoquímicas.

Sary Awad junto con otros 3 autores (2013) realizaron un experimento en el cual comparan la producción de biodiesel usando diferentes materias primas (grasa de pato, aceite de cocina quemado y grasas animales de desecho). De acuerdo a los resultados obtenidos el parámetro más importante fue el tiempo de reacción seguido por la relación aceite/alcohol. El tiempo de reacción fue de 5 horas con un catalizador homogéneo (relación 1.8% del peso) y con un porcentaje entre 30 y 50% más de alcohol que de aceite, con estos parámetros el rendimiento fue mayor al 95%.

Armendáriz y otros autores (2015) especifican que la semilla de ricino puede contener entre 42 y 54.5% de aceite. Para la reacción se utilizó como catalizador NaOH y como alcohol metanol durante dos horas. Los rendimientos obtenidos fueron buenos, reportando entre 68.9 y 93.2%, considerando el aceite de ricino apto para la síntesis de biodiesel aunque, según los autores, presenta ciertas dificultades para ser usado solo por no cumplir con los estándares en cuando a viscosidad cinemática, densidad y contenido de agua.

En la figura 32 se hace una comparación sobre la producción de biodiesel a partir de diferentes materias primas, catalizadores, temperaturas y tiempos.

Materia prima	Relación molar alcohol/aceite	Catalizador	Catalizador en (%)	Tiempo en (h)	T (°C)	Rendimiento (%)
<b>Canola</b>	7:1	Óxido de Ca/Zn	8	6	120	92
<b>Palma</b>	6:1	NaOH	0.7	1	60	94
<b>Palma</b>	6:1	KOH	0.7	1	60	95
<b>Ricino</b>	25:1	NaOH	0.5	2	60	93
<b>Pollo</b>	20:1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.21 %v/v	1-2	50-70	94

FIGURA 32. Tabla con comparación de diferentes variables en la síntesis de biodiesel. Fuente: Awad et al., (2013); Armendáriz et al., (2015).

Las pruebas del biodiesel en los motores diésel, ya sea solo o combinado con el combustible fósil son de vital importancia para tener la certeza de que el biocombustible puede ser usado.

Algunos estudios (Di, Cheung y Huang, 2008) han demostrado que hay beneficios al usar mezclas de biodiesel y diésel en motores, ya que, en principio, al haber más oxígeno en la mezcla aire/combustible se produce una combustión más completa. Las investigaciones demuestran que, en general, las emisiones de HC y CO son menores aun que hay un ligero aumento en las emisiones de NOx.

Mirzajanzadeh et al (2015) explica que el uso combinado del diesel y un mínimo de 20% de biodiesel reduce las emisiones al ambiente de NOx, CO, HC y hollín hasta en un 18.9%, 38.8%, 71.4% y 26.3% respectivamente. También argumenta que aumenta el rendimiento en el motor en hasta 7.81% y ahorro de combustible del 4.50%.



Pero además de los beneficios de la mezcla entre 20% de biodiesel y 80% diesel (B20), también los hay cuando solo se usa un 10% de biocombustible (B10), tal como lo expone Gürü et al., (2010), donde al estudiar los efectos en el motor, rendimiento y emisiones de una mezcla B10 a partir de grasa de pollo, se concluye que el torque del motor no se ve alterado, las emisiones de SOx disminuyen significativamente, las de CO y humo se reducen entre 9 y 13%; pero aumentan las de NOx en 5% y el consumo de combustible en 5.2% a causa del menor poder calorífico del biodiesel. Argumentan que es viable el uso de biodiesel a partir de grasa de pollo por su bajo costo, tanto como materia prima y de operación, además de ser un residuo.

Un estudio similar de los efectos del biodiesel en el motor es el de Sattanathan (2013); en el cual, el autor hace una evaluación con diferentes mezclas de diesel y biodiesel obtenido del aceite de ricino. Concluye que hay un ligero aumento en el consumo de combustible y una leve baja en el rendimiento del motor en cualquier proporción de mezclado. En cuanto a emisiones de hidrocarburos no quemados, en cualquier proporción hay una notoria disminución en las emisiones, siendo el B25 la mezcla donde hay una mayor reducción de estos. Por último, el autor indica que las emisiones de humo disminuyen en cualquier mezcla, esto es por el contenido de oxígeno del biodiesel, lo que permite una combustión más completa.

Para garantizar que el biodiesel se puede usar como combustible debe tener similitudes en cuanto a las características fisicoquímicas con el diesel con el propósito de no provocar daños al motor. Alptekin, Canakci y Sanli (2014) evalúan ciertas propiedades del biocombustible comparándolas con las Normas EN-14214 y ASMT-D6751 para saber si su producto cuenta con la calidad esperada. Los autores llegan a la conclusión de que el biodiesel producido cumplió con los estándares marcados. Entre las propiedades que se analizaron están la viscosidad, densidad, calor de combustión, número de cetano, etc.

La figura 33 permite apreciar de una manera más gráfica las propiedades del biodiesel según la consulta bibliográfica.

Materia prima	Catalizador	Poder calorífico (MJ/Kg)	Viscosidad cinemática (40°C) (mm <sup>2</sup> /s)	Densidad (15°C) (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Pollo</b>	Ácido sulfúrico	39.728	5.27	889.8
<b>Ricino</b>	NaOH		16.5	945.2
<b>Pollo</b>	CaO	37.6	4.1	874

FIGURA 33. Tabla con comparación de las propiedades del biodiesel según la materia prima. Fuente: Sattanathan (2013); Alptekin, Canakci y Sanli (2014)

## 7 METODOLOGÍA

---

Para satisfacer todos los objetivos planteados, la parte experimental se dividió en 4 principales etapas (figura 34).

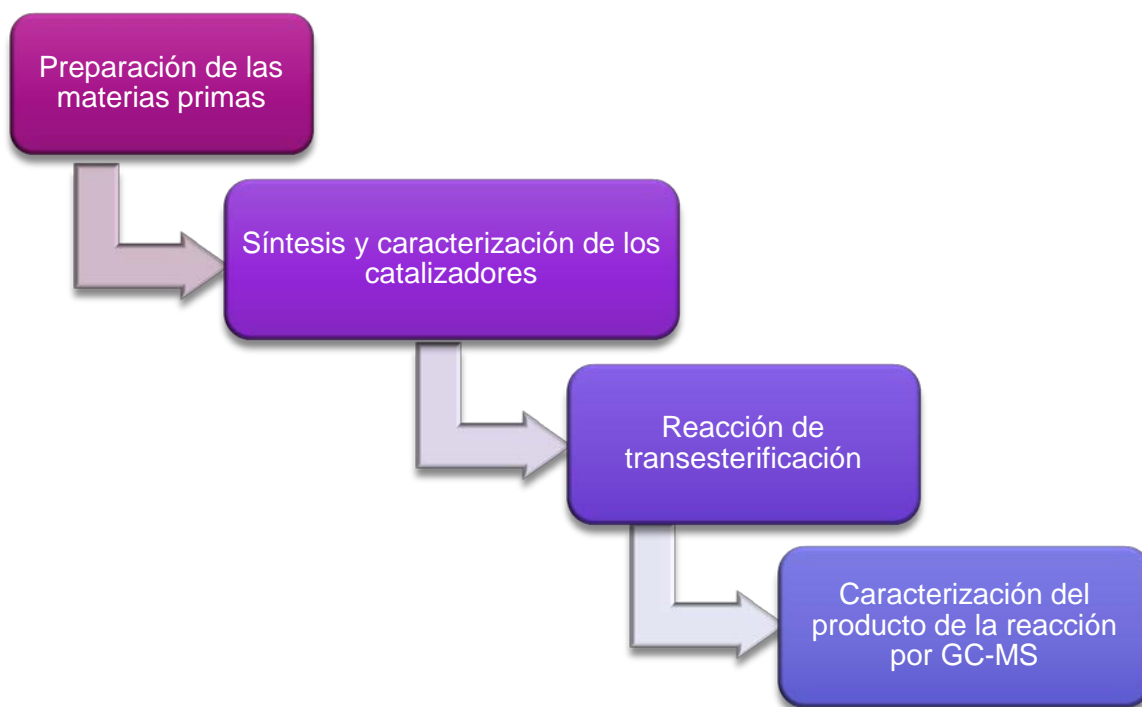


FIGURA 34. Diagrama general de la metodología empleada

Previo al desarrollo de la experimentación todo el material a utilizar se lavó con jabón común y se enjuagó bien con agua destilada. Se depositó en una solución sulfocrómica para quitar las impurezas y residuos de jabón durante 24 horas (Figura 35).



FIGURA 35. Material sumergido en solución sulfocrómica.

Transcurrido el tiempo, se enjuagó de nuevo con agua destilada, se dejó secar en una estufa a 100°C por completo y se guardó en bolsas de polietileno selladas hasta su uso.

## 7.1 RECOLECCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

---

Para el caso de la higuierilla se recolecto de un terreno baldío cercano a la universidad ya que es considerada como maleza. Se le retiro la cáscara para dejar libres las semillas. Se dejaron secar durante 24 horas en una estufa a 90°C (Figura 36).



FIGURA 36. Semillas de higuierilla previas a su molienda.

La grasa de pollo se obtuvo de una pollería también situada en las cercanías de la universidad sin costo alguno por se considerada desecho.

---

## 7.2 TRATAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS

---

Las semillas se trituraron y posteriormente se volvieron a dejar en la estufa a 90°C por 24 horas para asegurarse que se eliminó toda la humedad contenida en ellas. Por otra parte, la grasa de pollo se lavó con agua para eliminar cualquier impureza y se dejó en una estufa a 60°C por 24 horas. Pasado el tiempo se cortó en trozos pequeños para poder introducirse en el dedal de extracción de celulosa.

Posteriormente se extrajo el aceite por medio de un equipo Soxhlet. Se añadieron 20 g en un dedal de extracción para equipo Soxhlet y en un matraz bola 100 ml de éter; posteriormente el Soxhlet se conectó a un equipo de refrigeración, dejando el proceso de extracción trabajando durante 9 horas. Pasado el tiempo indicado, en un evaporador rotatorio separó el éter del aceite. El agua del recipiente del evaporador se calentó a 80°C y se introdujo el matraz con la mezcla de éter/aceite a 30 rpm; el proceso se dejó hasta que se separaron por completo las dos sustancias. El aceite obtenido se pesó en una balanza y se conservó en congelación hasta su uso.

El procedimiento se repitió con la grasa de pollo utilizando las mismas cantidades.

Además del procedimiento anterior, el aceite de pollo se extrajo por medio de calor en una estufa. Se depositaron 500 g de grasa en un vaso de precipitado y se colocó en la estufa a 70°C durante 6 horas. Pasado el tiempo se filtró, se pesó y se conservó en congelación.

El aceite de ricino fue comercial debido a que es más práctico, bajo costo y no se requiere de solventes para la extracción.

---

## 7.3 SÍNTESIS DE LOS CATALIZADORES

---

---

### 7.3.1 ZIRCONIA SULFATADA ( $\text{ZrO}_2/\text{SO}_4^{2-}$ )

---

La síntesis de este catalizador se realizó por el método sol-gel, el cual consiste, según Brinker & Scherer (1990) en la hidrólisis del precursor a partir de pequeñas partículas en un disolvente (sol) y la condensación de las partículas a partir de la formación del óxido (gel).

El primer paso fue colocar 50 ml de propóxido de Zirconio (IV) Sigma-Aldrich en un matraz de tres bocas y se añadieron 50 ml de propanol. Se puso en agitación y se agregaron 100 ml de agua destilada. La agitación permaneció durante 24 horas. El sólido se recuperó y se secó 24 horas a 100°C (figura 13).

Para la sulfatación, se agregaron 0.5445 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1M. Ésta cantidad se calculó estimando que por cada 1000 ml de agua destilada agregada es necesario 100.2 g de ácido sulfúrico 1M. La mezcla permaneció en la estufa durante 24 horas. Pasado ese tiempo se calcinó en una mufla a  $400^\circ\text{C}$  y, para evitar que absorba humedad se tapó y se selló bien (figura 37).



FIGURA 37. Síntesis de la zirconia sulfatada por el método sol-gel.

---

### 7.3.2 HIDRÓXIDO DE POTASIO SOPORTADO EN ALÚMINA ( $\text{KOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ )

---

En un matraz bola se depositaron 2.5 g de KOH, 10 g de  $\gamma$ -Alúmina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) y 100 ml de agua destilada. Se dejaron en agitación durante 24 horas a  $80^\circ\text{C}$  (figura 38). Posteriormente se llevó a una estufa a  $100^\circ\text{C}$  para evaporar el agua y secar bien el sólido. Por último se calcinó a  $500^\circ\text{C}$  por 5 horas y se selló bien para evitar su contaminación o absorción de humedad (figura 39) (Solís, 2011).



FIGURA 38. KOH/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> previo a la eliminación de humedad en la estufa.

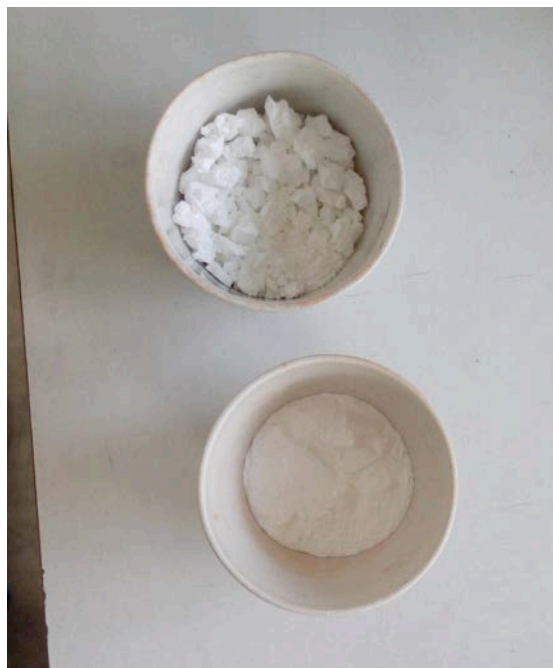


FIGURA 39. Catalizadores calcinados listos para su uso

## 7.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS CATALIZADORES

La caracterización de los catalizadores se realizó para determinar ciertas características que, según Ocsachoque (2004) sirven para:

- Difracción de rayos X (XDR). Se utiliza para determinar la estructura de los catalizadores, es decir, las fases cristalinas. Esta prueba se llevó a cabo en el Laboratorio del Departamento de Ciencias Básicas de la UAM Azcapotzalco
- Área superficial. Se utiliza para determinar la superficie del material que va a interactuar con el medio que le rodea; a medida que el tamaño de partícula disminuye, el área superficial aumenta. En este caso el medio que rodea a los materiales es el aceite y el alcohol para la transesterificación. Las pruebas se realizaron en el área de Materiales de CBI.

Para determinar el área superficial con la fisisorción de nitrógeno (BET) se usó un equipo analizador de superficies a 77 K. Se requirieron 100 mg de catalizador para esta prueba y degasificaron durante 2 horas a 473 K. Los valores del área superficial se calcularon tomando en cuenta las isothermas de adsorción con un valor de  $0.164 \text{ nm}^2$  para la molécula de  $\text{N}_2$  a  $-196^\circ\text{C}$ .

El modelo BET determina el área superficial del sólido ( $A_s$ ) a través de la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{V_m}{22414} N_a \sigma$$

ECUACIÓN 2. Ecuación para determinar el área superficial de un material

Dónde:

$V_{\text{ads}}$  = Volumen de gas adsorbido

$P$  = Presión de saturación del nitrógeno a 77 K

$C$  = Constante relacionada con la energía de adsorción.

El valor de  $V_m$  puede ser estimado por medio del cálculo de los parámetros de la ecuación de BET:

$$V_{\text{ads}} - V_m = \frac{\frac{CP}{P_s}}{(1 - \frac{P}{P_s})(1 + (C - 1)\frac{P}{P_s})}$$

ECUACIÓN 3. Ecuación para determinar el volumen de gas adsorbido

Dónde:

$V_{\text{ads}}$  = Volumen de gas adsorbido

$P$  = Presión de saturación del nitrógeno a 77 K

C = Constante relacionada con la energía de adsorción.

La metodología para determinar el área superficial se tomó del libro “Diseño de catalizadores para una obtención limpia de 2-feniletanol” (Bergada, 2007).

Espectroscopia infrarrojo (IR). Se utilizó para conocer los grupos químicos principales de los catalizadores. Las pruebas correspondientes se hicieron en un espectrofotómetro por transformada de Fourier propiedad del área de Materiales de CBI.

## 7.5 REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

Las diferentes reacciones para la obtención del biodiesel se llevaron a cabo por separado. En la figura 40 se resume la materia prima, tiempo, catalizador, temperatura y relación molar de cada una de las reacciones. En todos los casos el alcohol utilizado fue metanol en una relación molar de 6:1 alcohol/materia prima. La cantidad de catalizador utilizado fue de 1% en peso según la cantidad de aceite utilizado. Los aceites usados fueron el comercial (ricino) y el extraído por medio de calor (pollo).

Número de reacción	Identificador de reacción	Aceite usado	Cantidad de aceite (g)	Catalizador	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
1	B1	Pollo	15.067	ZrO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub>	1	60-70
2	B2	Pollo	15.048	KOH/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	60-70
3	B3	Pollo	15.190	KOH/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	60-70
4	B4	Pollo	20.667	ZrO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub>	6	60-70
5	B5	Ricino	25.190	ZrO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub>	1	60-70
6	B6	Ricino	20.156	KOH/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	60-70
7	B7	Ricino	20.200	KOH/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9	60-70
8	B8	Ricino	20.032	KOH/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	60-70
9	B9	Ricino	20.093	ZrO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub>	9	60-70
10	B10	Ricino	20.072	ZrO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub>	6	60-70
11	B11	Pollo	20.127	ZrO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub>	9	60-70
12	B12	Pollo	18.833	KOH/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9	60-70

FIGURA 40. Tabla de reacciones de transesterificación hechas



## 7.6 ANÁLISIS DEL BIODIESEL

---

Durante cada reacción se tomaron alícuotas de aproximadamente 0.5 ml y cada una se analizó por cromatografía de gases con el objetivo de poder determinar el comportamiento de las reacciones y al mismo tiempo los compuestos (metil ésteres) que conforman al biodiesel.

En el caso de las reacciones de 1 hora, se tomaron alícuotas cada 10 minutos; mientras que en las demás, se hizo cada hora.

El análisis de cromatografía se llevó a cabo en un Cromatógrafo de gases HP-6890 con las siguientes condiciones:

- Columna "Capilar DB-Wax de 60 m de largo, 0.0250 mm de diámetro y 0.25  $\mu$ m de espesor.
- Gas de arrastre Helio (He)
- Relación aire-hidrógeno en el FID de 10:1
- Inyector y detector a temperatura de 220°C

La rampa de la corrida inició con una temperatura de 50°C en el horno durante 3 minutos; subió a 70°C a 3°C/minuto y se mantuvo durante 5 minutos más. Finalmente sube a 220°C a 10°C/minuto y se mantuvo durante 70 minutos.

## 8 RESULTADOS

### 8.1 EXTRACCIÓN DEL ACEITE

El resultado de la extracción de los aceites por medio del Soxhlet se muestra en la figura 41.

Materia prima	Peso Inicial de muestra (g)	Aceite obtenido (g)	Aceite obtenido respecto a la cantidad inicial (%)	Aceite obtenido en otras publicaciones (%)
Semillas de higuera	20	9.47	47.35	42 - 54.5
Grasa de pollo	20	9.18	45.9	70

FIGURA 41. Tabla de resultados de la extracción de los aceites

Los porcentajes de extracción observados en la tabla anterior arrojan que las cantidades de aceite en ambas materias primas son similares. La extracción del aceite de pollo por medio de calor tuvo un rendimiento de 46%, es decir, se extrajeron 230 g de grasa líquida.

Se considera que la extracción del aceite de pollo es más viable, ya que su tratamiento es más fácil y se puede evitar el uso de solventes haciendo la extracción solo con calor. Además, según la cantidad de materia prima que se tiene, puede ser el tamaño del recipiente a diferencia del método Soxhlet, donde se limita la cantidad de materia al tamaño del equipo de destilación. En la figura 42 se aprecia el momento en que el aceite de pollo es filtrada a un vaso de precipitados.



FIGURA 42. FILTRADO DE GRASA DE POLLO.

---

## 8.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS CATALIZADORES

---

---

### 8.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

---

En la figura 43 se presenta el patrón de difracción de rayos X de la zirconia sulfatada. Por comparación, se observa que la fase tetragonal de la zirconia está presente; la cual es la estructura cristalina activa en la reacción. En menor proporción se encuentra la fase monoclinica la cual es una transición de la fase tetragonal a altas temperaturas del tratamiento térmico, la transición de tetragonal a monocíclica está asociada a la alta temperatura del material catalítico y en la medida que se logro disminuir la temperatura de transición, más estable es la estructura del material. El azufre estabiliza la fase tetragonal del óxido de zirconia.

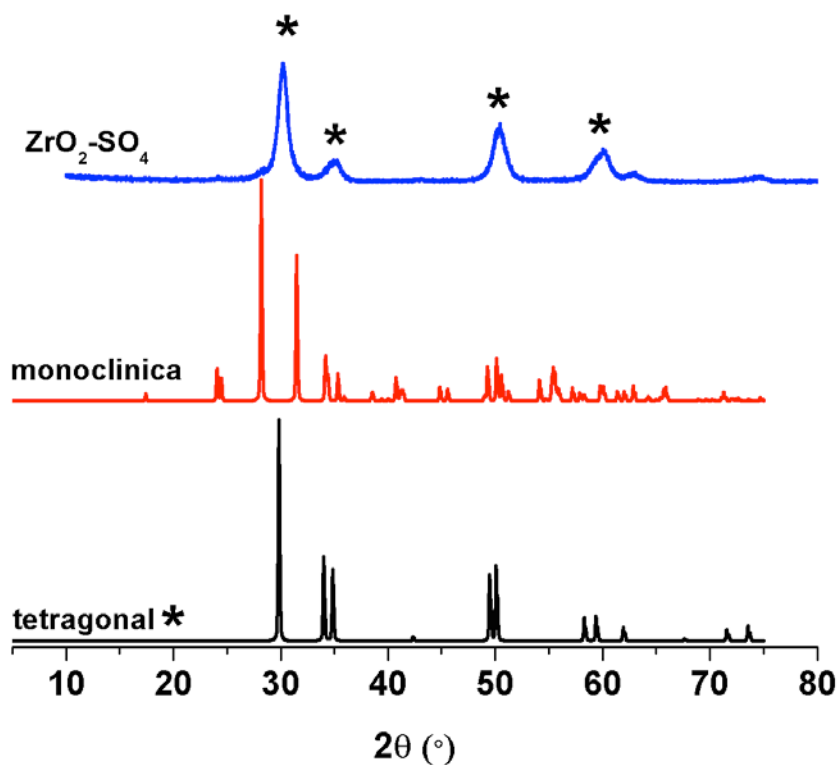


FIGURA 43. Difracción de rayos x del catalizador ácido  $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4$ . La fase tetragonal (\*) está presente así como una parte corresponde a la fase monoclinica.

La figura 44 muestra los análisis de difracción de rayos X, realizados a los catalizadores preparados con la alúmina. La alúmina muestra un patrón de difracción con picos en  $2\theta = 32^\circ$ ,  $37^\circ$ ,  $46^\circ$  y  $67^\circ$ ; la presencia de picos en  $2\theta = 15^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $21^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $28^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $37^\circ$ ,  $41^\circ$ ,  $46^\circ$ ,  $51^\circ$  y  $55^\circ$  revela la presencia de nuevas fases conformadas por  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{AlOK}$  que son productos de la reacción entre el  $\text{KOH}$  y la alúmina.

La estabilización de estas fases incorpora nueva actividad a la alúmina, además de que el tamaño de cristal se encuentra en ambos catalizadores en el rango nanoestructurado, es decir, las dimensiones de la estructura cristalina está de acuerdo a los parámetros establecidos para poder realizar la reacción de transesterificación de triglicéridos.

Los procesos en la reacción se desarrollarán más rápidamente debido a estos catalizadores incrementando la selectividad y el rendimiento hacia el producto de la reacción deseado.

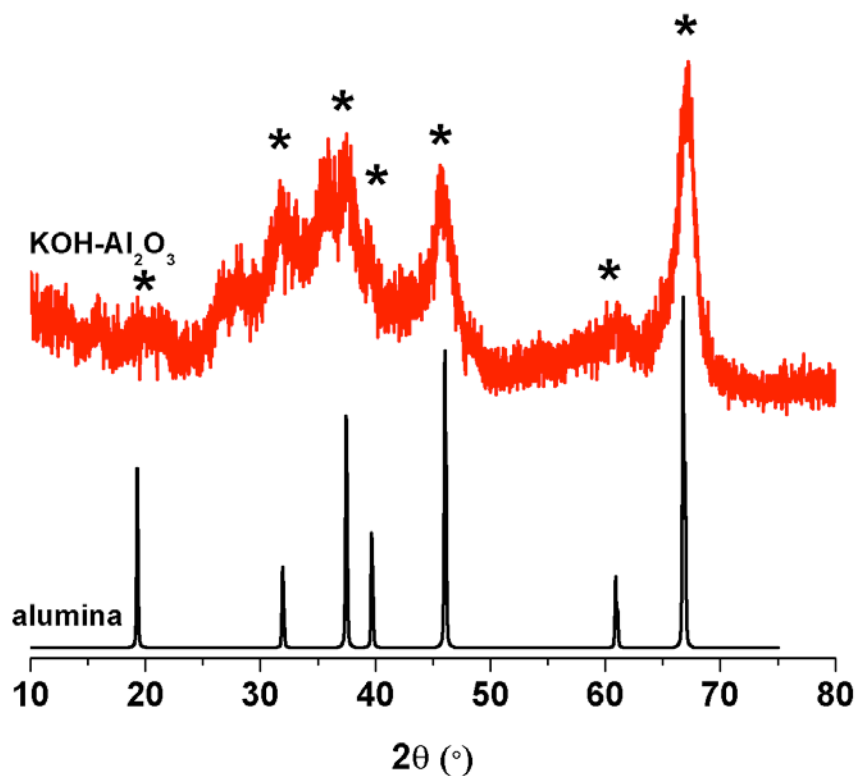


FIGURA 44. DIFRACCIÓN DE RAYOS "X" DEL CATALIZADOR BÁSICO KOH/ $\text{Al}_2\text{O}_3$

### 8.2.2 DETERMINACIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL POR FISISORCIÓN DE NITRÓGENO.

La técnica de fisisorción de gases es la más usual en la determinación de áreas superficiales y distribución de tamaños de poros de sólidos catalíticos empleados en reacciones químicas. Las isothermas obtenidas es una representación del volumen de nitrógeno fisisorbido en el sólido respecto a la presión relativa de nitrógeno y corresponden al proceso de adsorción y desorción del gas en el sólido, produciéndose un ciclo de histéresis cuando la isoterma de adsorción no coincide con la de desorción. Los sólidos se pueden clasificar en función del tipo de isothermas que presenten. En la figura 45 se presentan las isothermas de adsorción para el catalizador KOH- $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4$  así como la distribución del tamaño de poro.

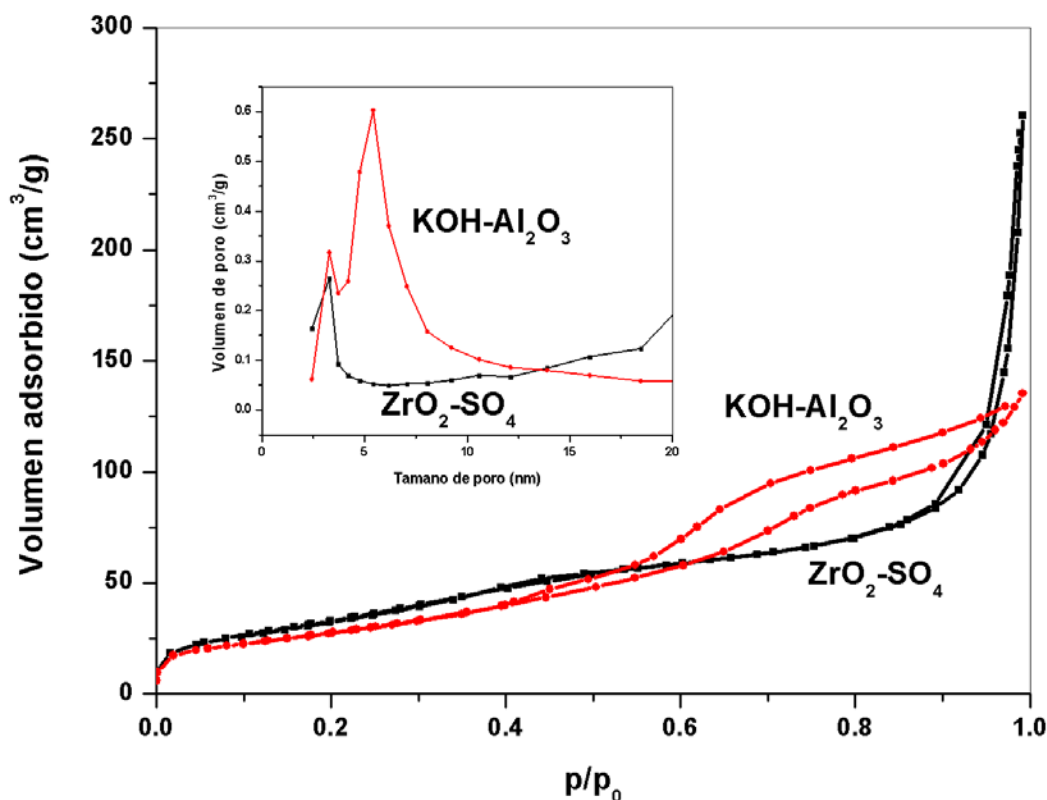


FIGURA 45. ISOTÉRMAS DE ADSORCIÓN DE  $N_2$  Y DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PORO.

En los análisis realizados a los catalizadores, el área superficial total fue grande para ambos materiales ( $105 \text{ m}^2/\text{g}$  para  $\text{KOH-Al}_2\text{O}_3$  y  $129 \text{ m}^2/\text{g}$   $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4$ ), considerándose macroporosos (Ravindra y Raman, 2015).

### 8.3 REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DEL BIODIESEL

#### 8.3.1 CONVERSIÓN

De las 12 reacciones hechas, en las que se obtuvo menor eficiencia de conversión de ácidos grasos a metil ésteres fue en aquellas que se utilizó el catalizador ácido de zirconia sulfatada ( $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4$ ), es decir, en las reacciones B1, B4, B5, B9, B10, B11. Por el contrario, las reacciones con el catalizador básico ( $\text{KOH-Al}_2\text{O}_3$ ) tuvieron una conversión superior al 50% en todos los casos (B2, B3, B6, B7, B8, B12) con ambas materias primas.

En la tabla de la figura 46 se puede observar qué cantidad de aceite se utilizó en cada reacción y cuanto se convirtió en metil ésteres. El resto, según la bibliografía consultada, se convirtió en glicerina y otros subproductos de la reacción (Sánchez, 2015) que no fueron analizados en este trabajo.

Reacción	Masa aceite (g)	Metil éster obtenidos (g)	Subproductos de la reacción (g)	Conversión (%)
<b>B1</b>	15.07	3.81	11.26	25.25
<b>B2</b>	15.02	10.09	4.93	67.18
<b>B3</b>	15.19	9.15	6.04	60.24
<b>B4</b>	18.67	5.68	12.99	30.40
<b>B5</b>	20.19	4.42	15.78	21.87
<b>B6</b>	20.16	13.26	6.90	65.79
<b>B7</b>	20.20	13.71	6.49	67.88
<b>B8</b>	20.03	11.63	8.40	58.07
<b>B9</b>	20.09	7.19	12.91	35.77
<b>B10</b>	20.07	6.64	13.43	33.10
<b>B11</b>	18.68	6.14	12.54	32.86
<b>B12</b>	15.56	10.74	4.82	69.01

FIGURA 46. EFICIENCIAS DE CONVERSIÓN DE LAS REACCIONES DE TRANSESTERIFICACIÓN HECHAS

En la gráfica de la figura 47 se muestra un comparativo de la conversión de todas las reacciones hechas. Se puede apreciar que en las reacciones de 1 hora con el catalizador básico la conversión fue muy similar con 60.24% y 58.07% con el aceite de pollo (B3) y el aceite de ricino (B8) respectivamente. Además, las mayores eficiencias de conversión fueron las reacciones de 9 horas con 67.88% y 69.01% con ricino y pollo respectivamente.

Las reacciones con menor conversión fueron aquellas de una hora con el catalizador ácido y con ambas materias primas, 25.25% para el caso del aceite de pollo y 21.87% con el de ricino.

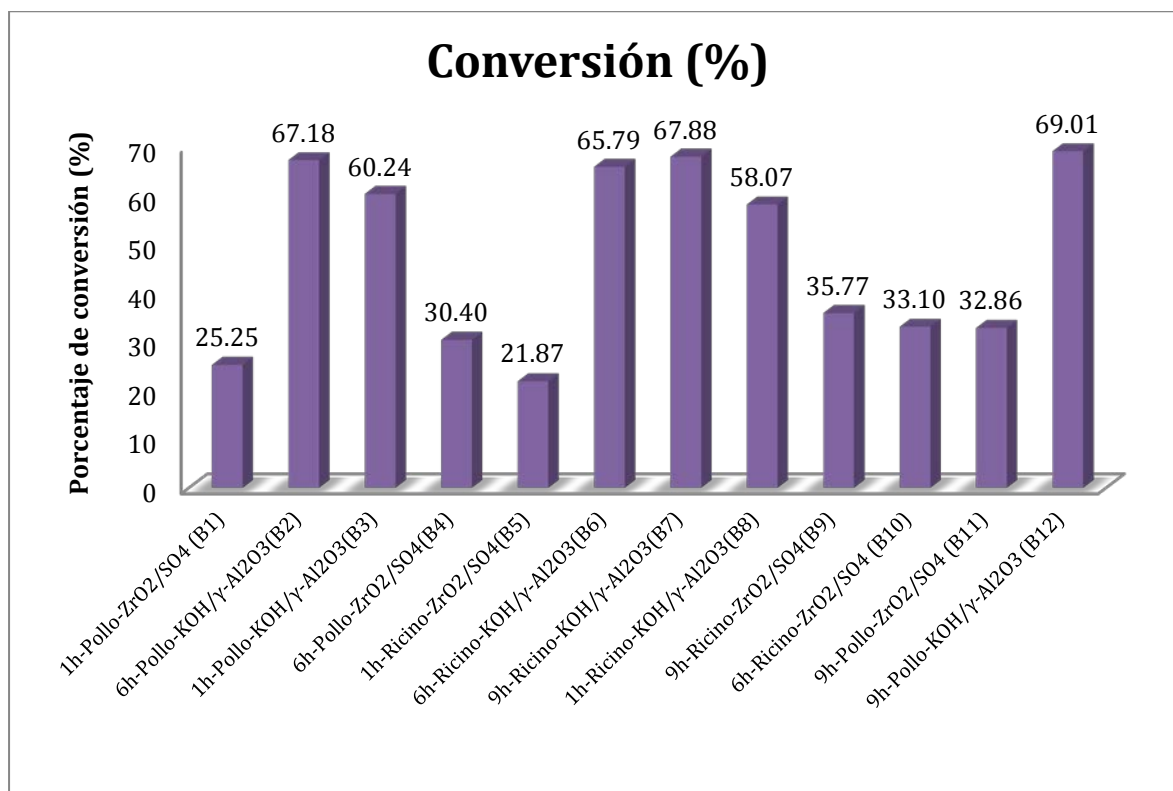


FIGURA 47. Gráfico comparativo de las conversiones obtenidas en las diferentes reacciones

Como se puede notar en la gráfica anterior cada mezcla de aceite y catalizador se hizo a tres diferentes tiempos con conversiones diferentes. En la gráfica se agruparon los datos de cada mezcla para poder evaluar el comportamiento de las reacciones en el tiempo. Se puede notar que la mayor actividad de conversión se realizó durante la primera hora de reacción para todos los casos, teniendo un comportamiento que se va haciendo lento con el paso del tiempo.

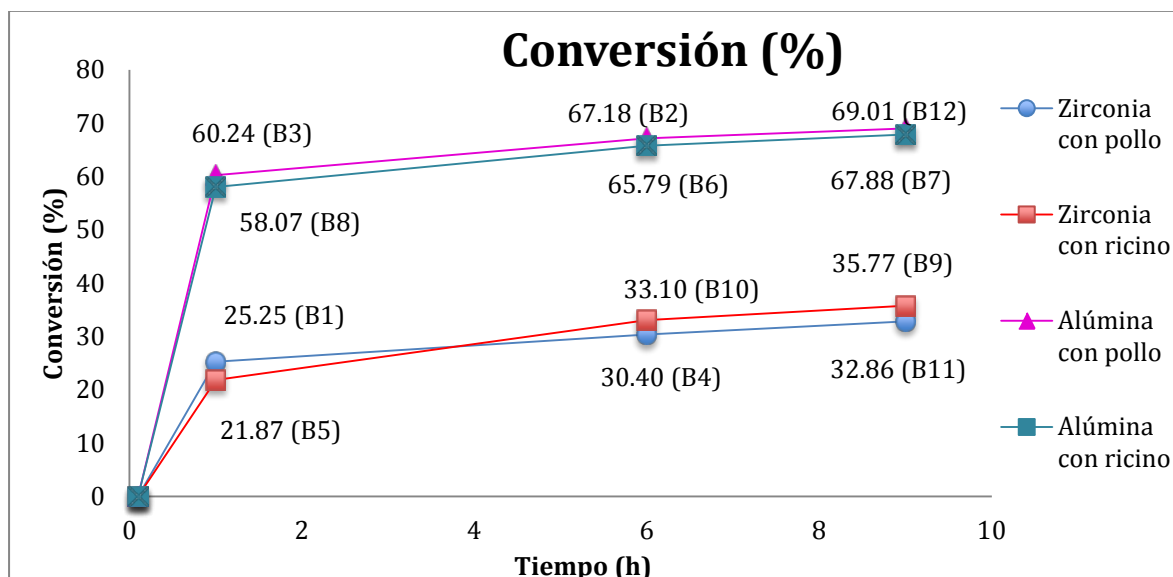


FIGURA 48. Gráfica de conversión según el catalizador y el aceite usado



Según los resultados observados en la figura 48, se puede decir que la mezcla más viable para llevar a cabo la reacción de transesterificación es con la  $\gamma$ -alúmina soportada con hidróxido de potasio y aceite de pollo (color rosa mexicano), esto es, dado que en todos los casos fue la que tuvo una mayor conversión.

Baskar y Soumiya (2016) reportan que obtienen eficiencias de conversión de aproximadamente 85% en un tiempo de 60 minutos y a 60C; en otro experimento, los mismos autores indican resultados de hasta 90% de conversión utilizando una relación de 14% de catalizador en peso con base en la cantidad de aceite utilizado igual en peso (%(w/w)). Hay que recordar que en este estudio todas las reacciones se hicieron con una relación de 1%(w/w) y a 60C; sin embargo, se considera que al aumentar la cantidad de catalizador se puede incrementar la conversión, pero de igual manera se incrementan los costos de producción.

Sin embargo, se requiere saber que el producto de la reacción sea de buena calidad, es decir la composición química del biodiesel. Para saber esto se determinaron los metil ésteres contenidos en él por cromatografía de gases y se calculó la selectividad de la reacción.

### 8.3.2 SELECTIVIDAD

En la gráfica de la figura 49 se detalla la selectividad de metil ésteres de todas las reacciones hechas con aceite de pollo. Hay que recordar que las reacciones B1, B4 y B11 fueron con zirconia sulfatada a 1, 6 y 9 horas respectivamente; las reacciones B2, B3 y B12 fueron con alúmina soportada en hidróxido de potasio a 6, 1 y 9 horas respectivamente.

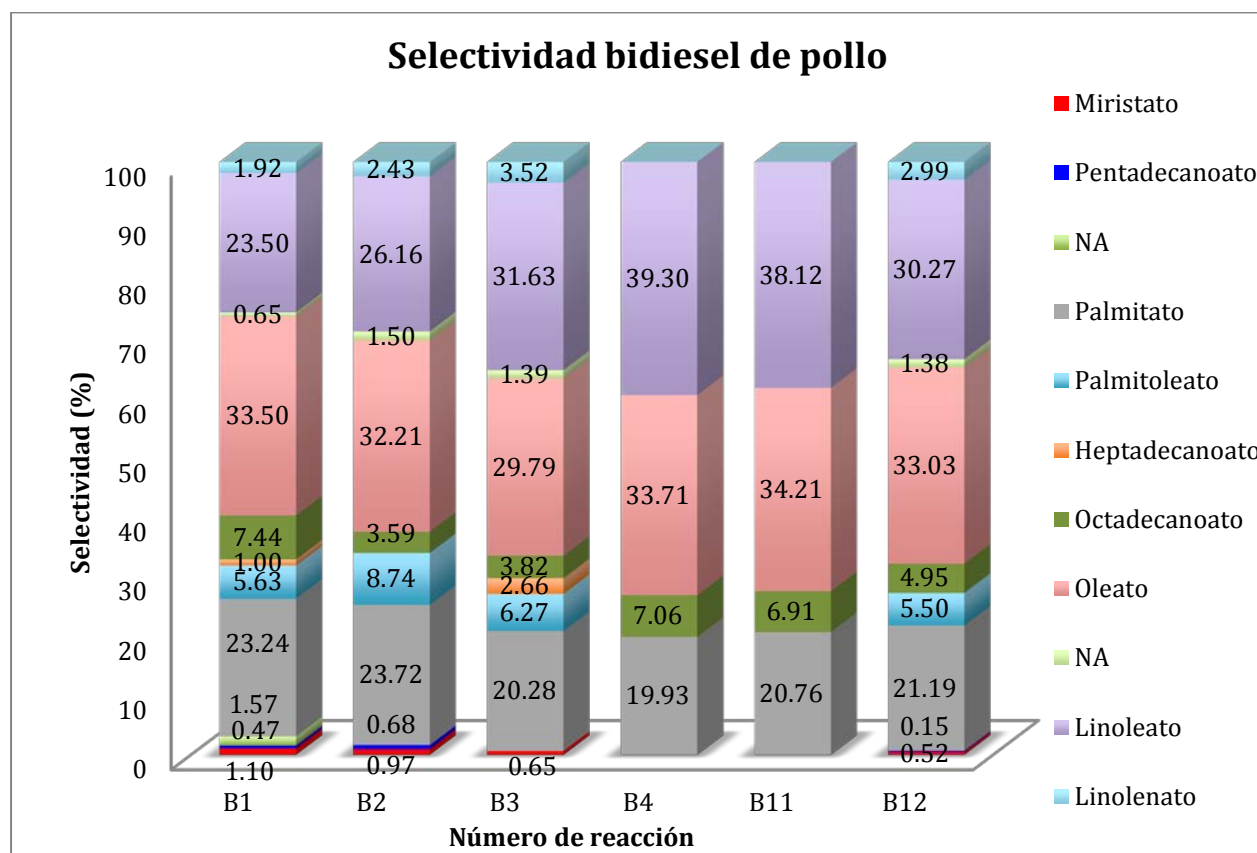


FIGURA 49. Gráfica de selectividad del biodiesel de pollo

Se puede notar en la gráfica anterior que en todas las reacciones los principales componentes son el metil oleato (color rosa), metil linoleato (color morado) y metil palmitato (color gris). En las reacciones B4 y B11 se tiene una composición de 4 metil ésteres; esto se puede atribuir a que en los dos casos las eficiencias de conversión fueron las más bajas y, por tanto se considera que no son biodiesel de calidad, ya que tanto en la bibliografía consultada y en otras reacciones hechas en este estudio, el biodiesel tiene por lo menos 7 u 8 componentes poner tabla comparativa.

En cambio, el biodiesel de ricino está compuesto en su mayoría por el metil ricinoleato, metil linoleato y metil palmitato (Sánchez, 2015). En la figura 50 se puede apreciar que en las reacciones hechas en este estudio la selectividad de estas tuvo una tendencia hacia estos tres compuestos.

Además, se puede observar que las reacciones B5, B9 y B10 tienen apenas 4 o 5 componentes, mientras que las demás reacciones tienen alrededor de 9. En los casos con menos compuestos, la eficiencia de conversión fue baja ya que se utilizó el catalizador ácido; mientras que las reacciones B6, B7 y B8 fueron hechas con el catalizador básico.

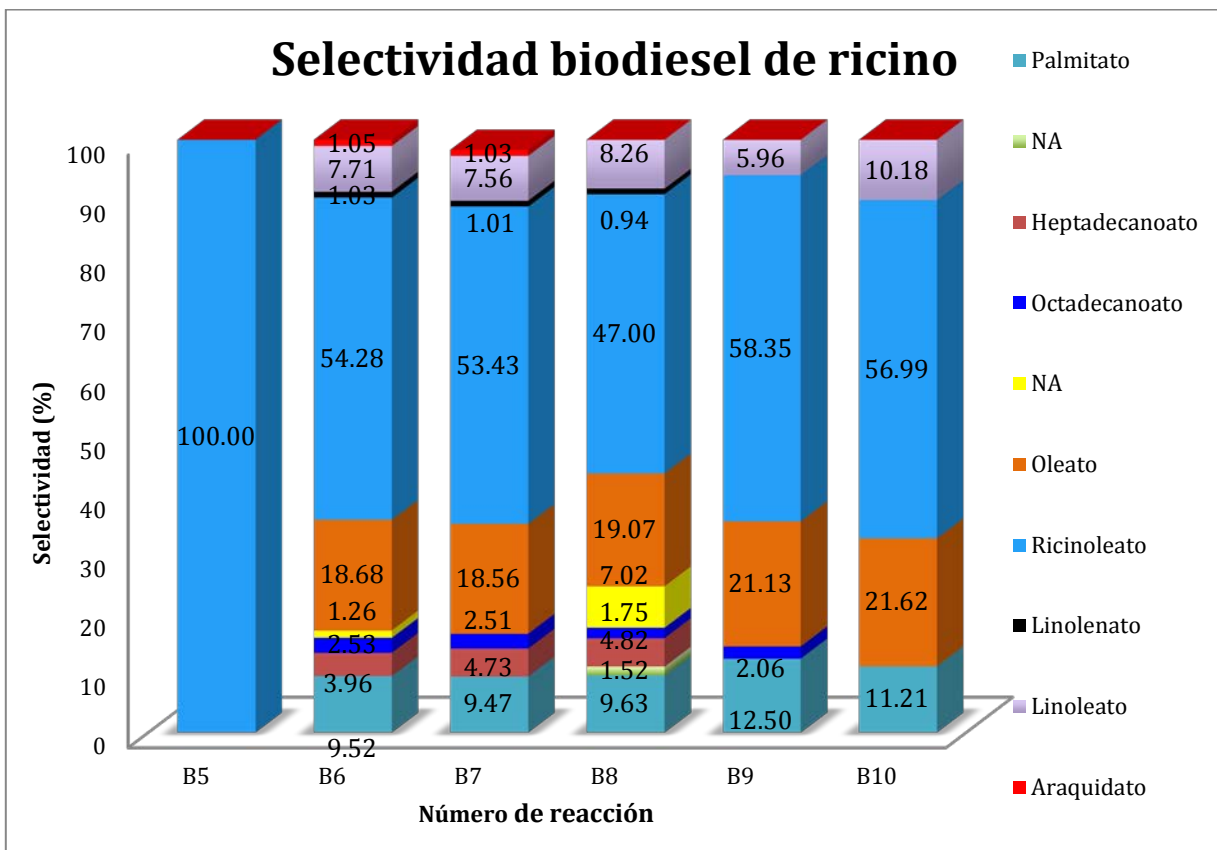


FIGURA 50. Gráfica de selectividad del biodiesel de ricino

En la tabla de la figura 51 se hace una comparación de la composición química del biodiesel obtenido en este estudio (promedio) y otros estudios similares. Según la tabla, las proporciones de los componentes varía, sin embargo, hay una notoria diferencia entre cuales son los ésteres de mayor y menor concentración.

Metil éster	Pollo (promedio)	Ricino (promedio)	Pollo; Chia y Shuo (2015)	Pollo; Bhatti (2008)	Ricino, Sánchez (2015)
<b>Miristato (C14:0)</b>	0.54	--	--	0.23	--
<b>Pentadecanoato (C15:0)</b>	0.22	0.3	--	--	--
<b>Palmitato (C16:0)</b>	21.59	8.72	16,86	24.65	1.20
<b>Palmitoleato (C16:1)</b>	4.36	--	--	6.92	--
<b>Heptadecanoato</b>	0.61	2.25	--	--	11
<b>Octadecanoato (18:0)</b>	5.63	1.48	6.19	6.25	0.93
<b>Oleato (C18:1)</b>	32.49	16.51	36.21	45.18	2.93
<b>Ricinoleato</b>	--	60.90	--	--	88.1
<b>Linoleato (C18:2)</b>	31.50	0.50	16.11	12.58	3.50
<b>Linolenato (C18:3)</b>	1.81	6.61	--	0.38	0,42
<b>Araquidato (C20:0)</b>	--	0.50	--	--	--

FIGURA 51. Tabla comparativa de la selectividad en este estudio con otras investigaciones

Para evaluar el comportamiento de la selectividad durante la transesterificación, se eligieron las reacciones de 6 horas hechas con alúmina soportada con hidróxido de potasio y cada uno de los aceites. En la figura 52 se presenta la gráfica de la reacción B2 (aceite de pollo). Se muestran los compuestos que están en mayor proporción en el biodiesel B2. Se puede notar que, a pesar de que el metil éster en mayor proporción es el oleato, el metil linoleato tiene una conversión más rápida que todos los demás.

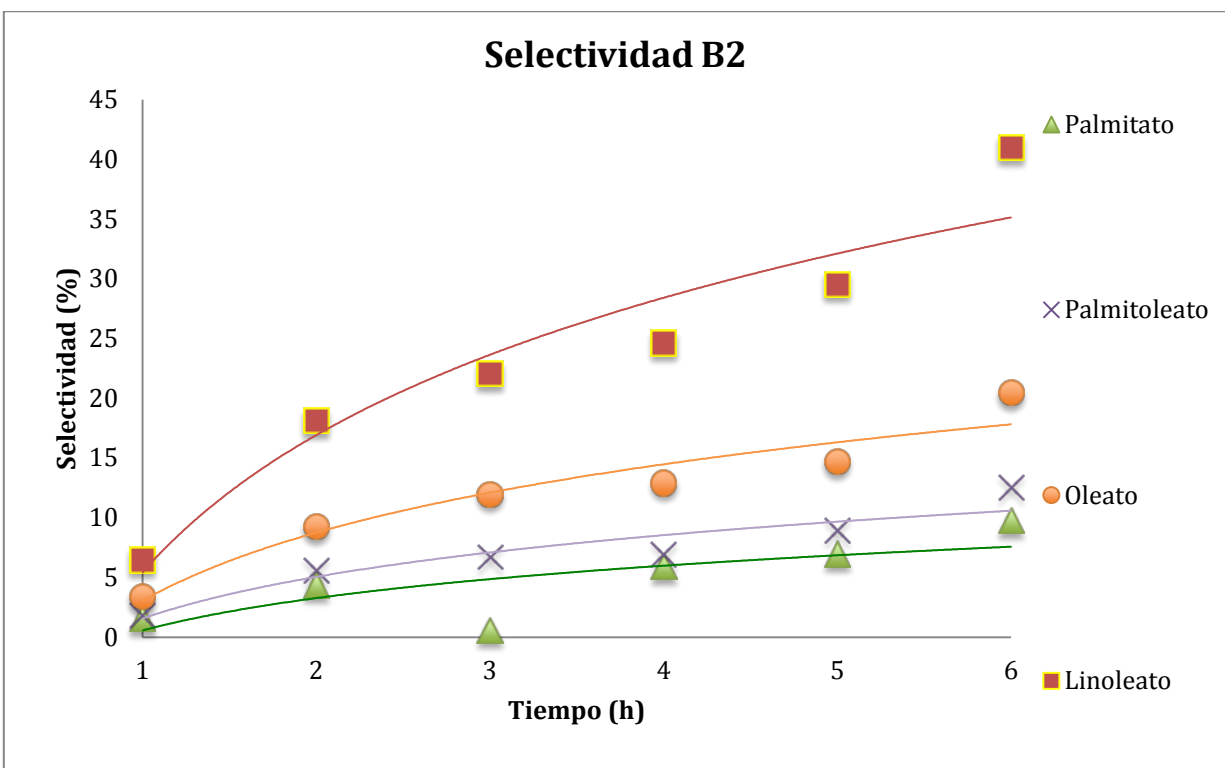


FIGURA 52. Gráfica de comportamiento de la selectividad en B2

En la figura 53 se puede ver el comportamiento de la selectividad de los metil ésteres que están en menor proporción en el biodiesel. Esta separación de los resultados en dos gráficas se hizo con el objetivo de que se pueda tener una mejor apreciación del comportamiento de todos los componentes durante la reacción.

Los resultados de la figura muestran que el metil pentadecanoato (rojo) no tiene una tendencia creciente como todos los demás compuestos. Se considera que este comportamiento se debe que puede tener una función de “intermediario” que ayude a la formación de otros ésteres conforme va decreciendo su concentración en el biodiesel.

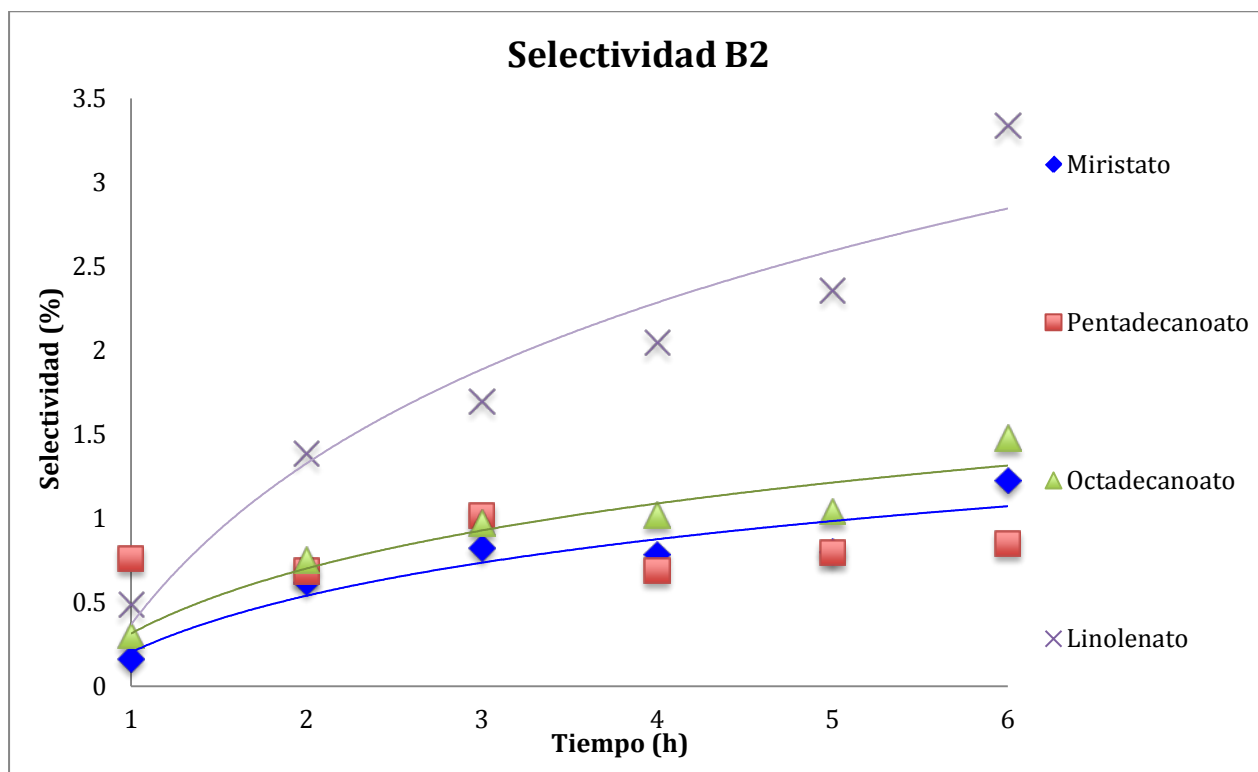


FIGURA 53. Gráfica de comportamiento de selectividad en B2

En las figuras 54 y 55 se puede observar las gráficas del comportamiento de la selectividad correspondientes a la mezcla del catalizador básico y aceite de ricino. De igual manera, los compuestos en mayor proporción se expresan en la figura 54 y los de menor en la 55.

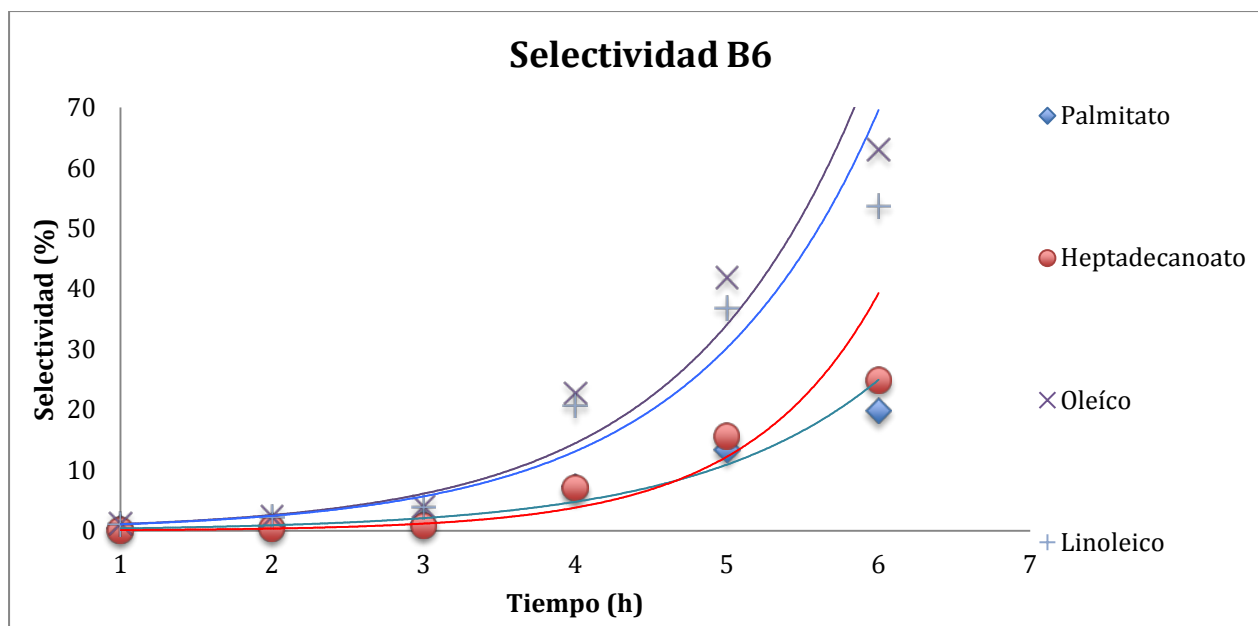


FIGURA 54. Gráfica de comportamiento de selectividad en B6

A diferencia de las reacciones de pollo, en las de ricino el comportamiento durante las primeras horas es un poco lento, incrementándose a partir de la cuarta hora. También hay que destacar que todos los compuestos tienen una tendencia a aumentar su concentración y, por tanto, no se ve en ningún momento que alguno tenga una tendencia decreciente.

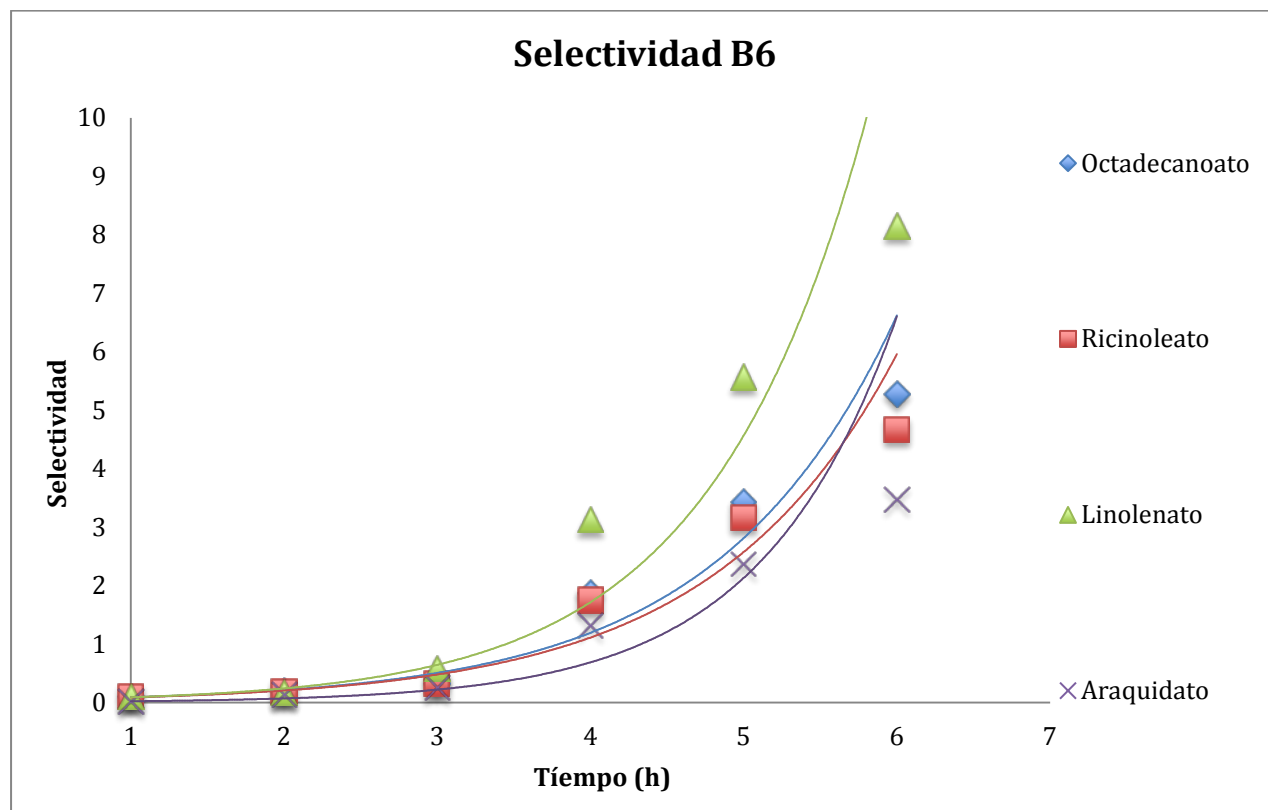


FIGURA 55. Gráfica de comportamiento de selectividad en B6

### 8.3.3 RENDIMIENTO

El rendimiento en las reacciones fue calculado para cada metil éster, es decir, cuanta cantidad del ácido graso se convirtió en un componente del biodiesel. En la figura 56 se aprecia una gráfica comparativa del rendimiento en las reacciones con pollo.

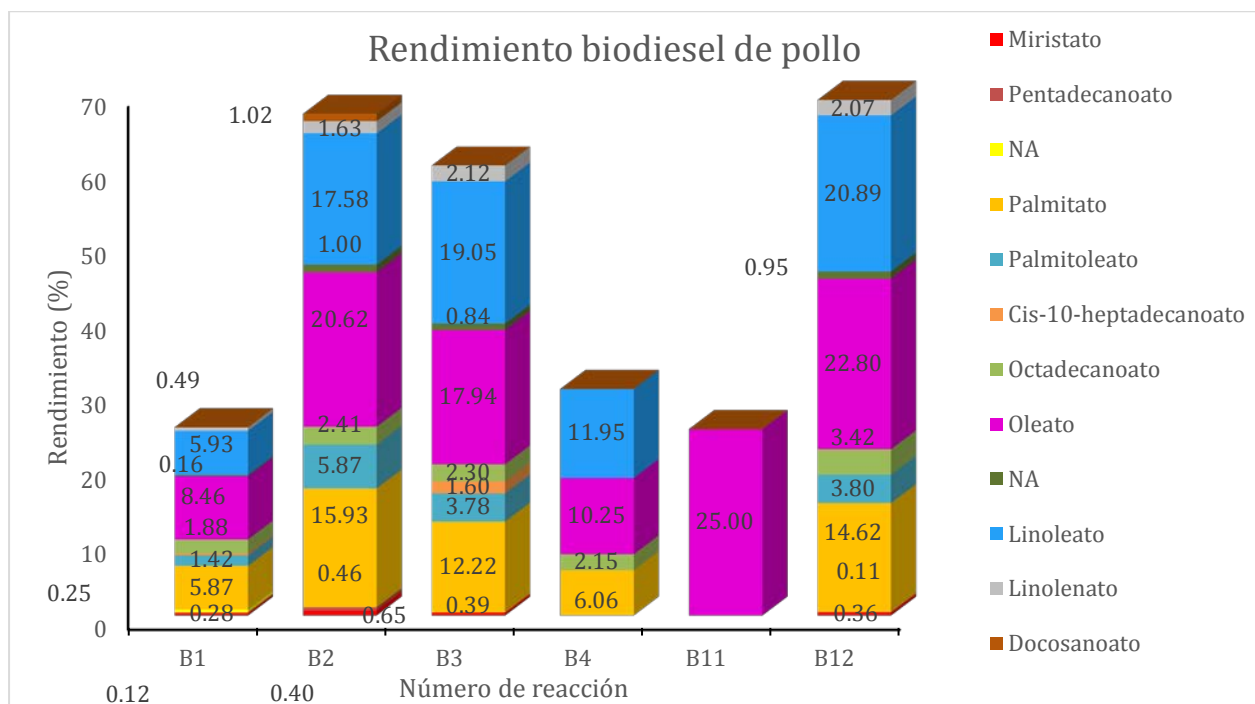


FIGURA 56. Gráfica de rendimiento de las reacciones de pollo

Como se puede ver la figura anterior, el rendimiento de los metil éster en mayor proporción fue alto en comparación de los que se encuentran en menor cantidad en el biodiesel. El comportamiento demostrado en las gráficas de selectividad indica que algunos compuestos pueden tener una función de intermediarios y, por esa situación, su rendimiento sea bajo.

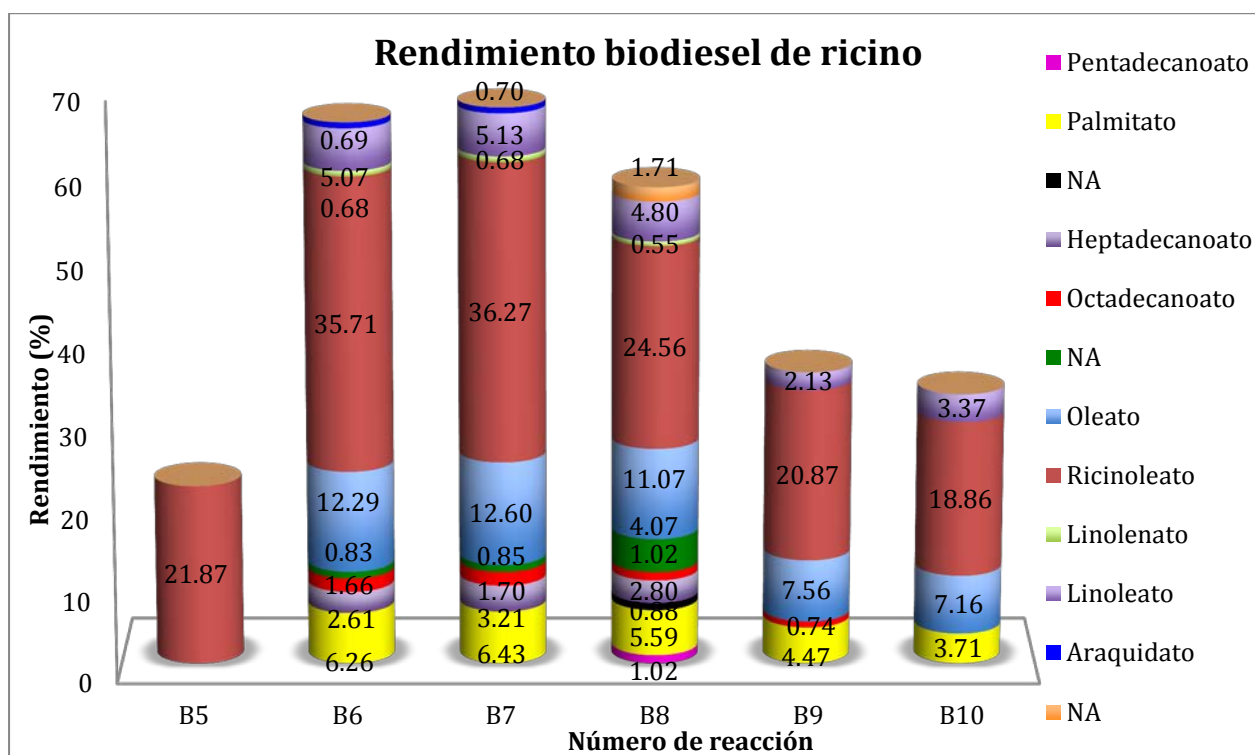


FIGURA 57. Gráfica de rendimiento en las reacciones de ricino

Manerung, Kawi, Dai y Wang (2016) Hace una evaluación del rendimiento de la reacción de transesterificación utilizando aceite de cocina usado. En los resultados de dichos autores, el rendimiento de la reacción a una hora es de 30% aproximadamente a 60°C y de 70% a 6 horas con la misma temperatura. Los autores indican que al aumentar la temperatura a 70°C los rendimientos se incrementan a 60% y casi 80% a una y seis horas respectivamente.

Con lo anterior se puede decir que el catalizador si influye en los rendimientos de la reacción, ya que como se puede ver en las gráficas, las reacciones que tuvieron rendimiento por encima del 50% fueron las que se hicieron con catálisis básica, mientras que las de menor rendimiento fueron las de catálisis ácida.

#### 8.3.4 CINÉTICA DE LAS REACCIONES

En la gráfica de la figura 58 se puede notar que las reacciones marcadas en color azul y rojo (B1 y B3) fueron las que presentaron una mayor velocidad, sin embargo, tomando en cuenta el valor de  $R^2$ , la mejor reacción fue la B1 con una  $R^2$  aceptable.

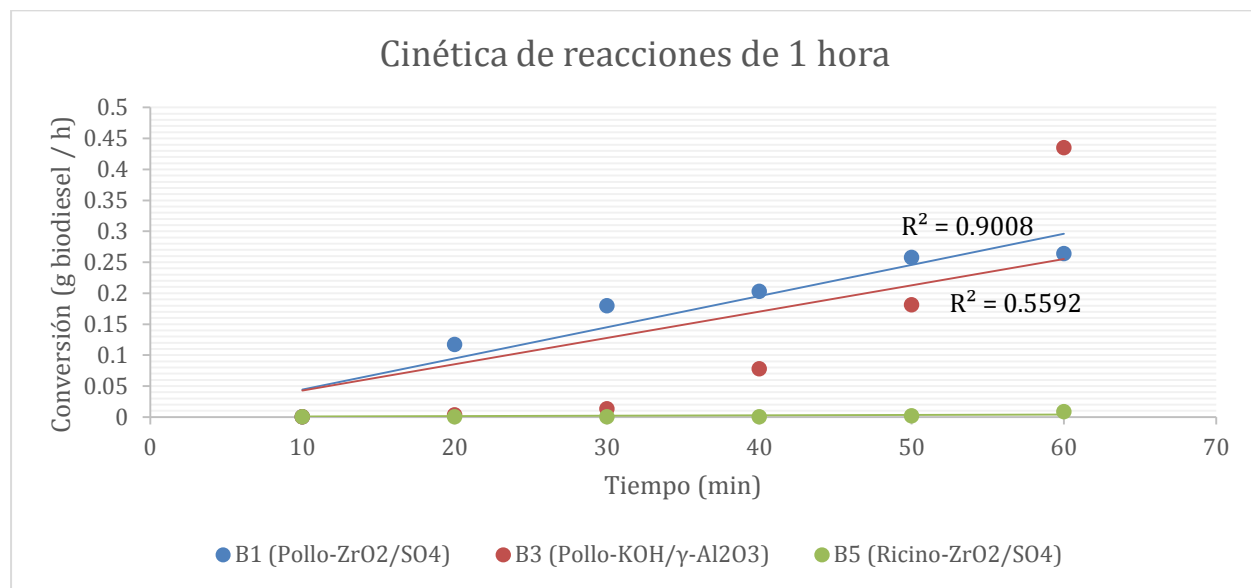


FIGURA 58. Cinética de reacciones de una hora

En el caso de las reacciones de 6 horas (figura 59), las mejores fueron aquellas con el catalizador básico. Se puede notar un incremento en el valor de  $R^2$  respecto a las reacciones de 1 hora con un máximo de  $R^2 = 0,9461$  (B2), considerándose como bueno. Las reacciones con el catalizador ácido no mostraron un comportamiento aceptable.



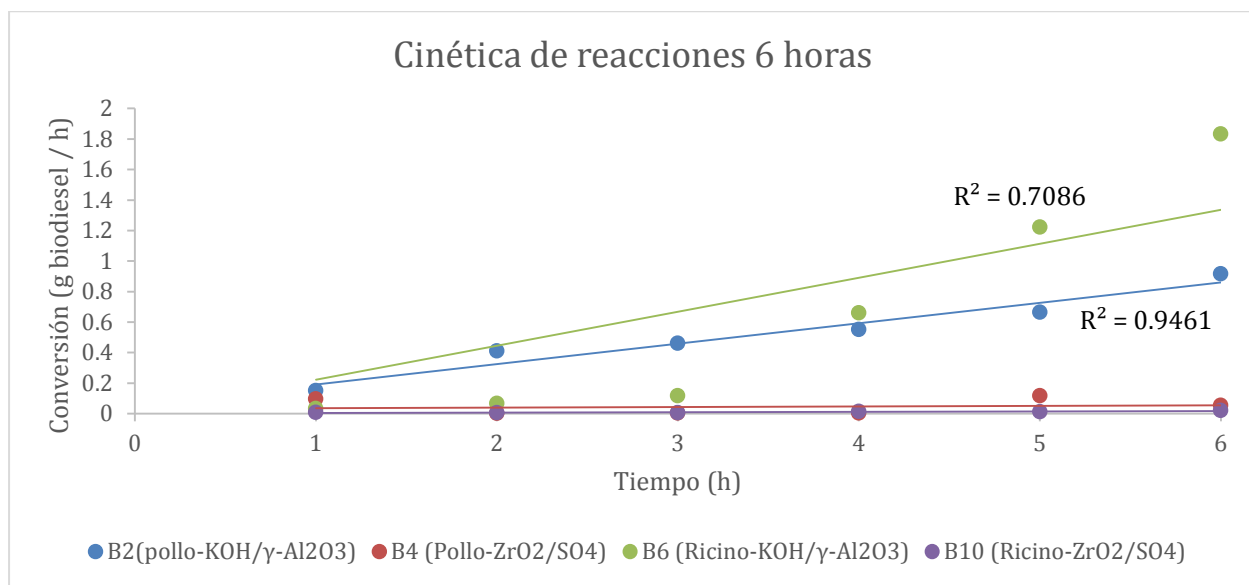


FIGURA 59. Gráfica de cinética de las reacciones de 6 horas

En la figura 60 también se puede apreciar que las reacciones con la catálisis ácida no muestran un buen comportamiento; por el contrario, las de catálisis básica tienen una mejoría y se incrementa el valor de  $R^2$ , aproximándose bastante a 1 (B12) y con una  $R^2 = 0.86733$  para el biodiesel B7, que también se puede considerar un valor aceptable.

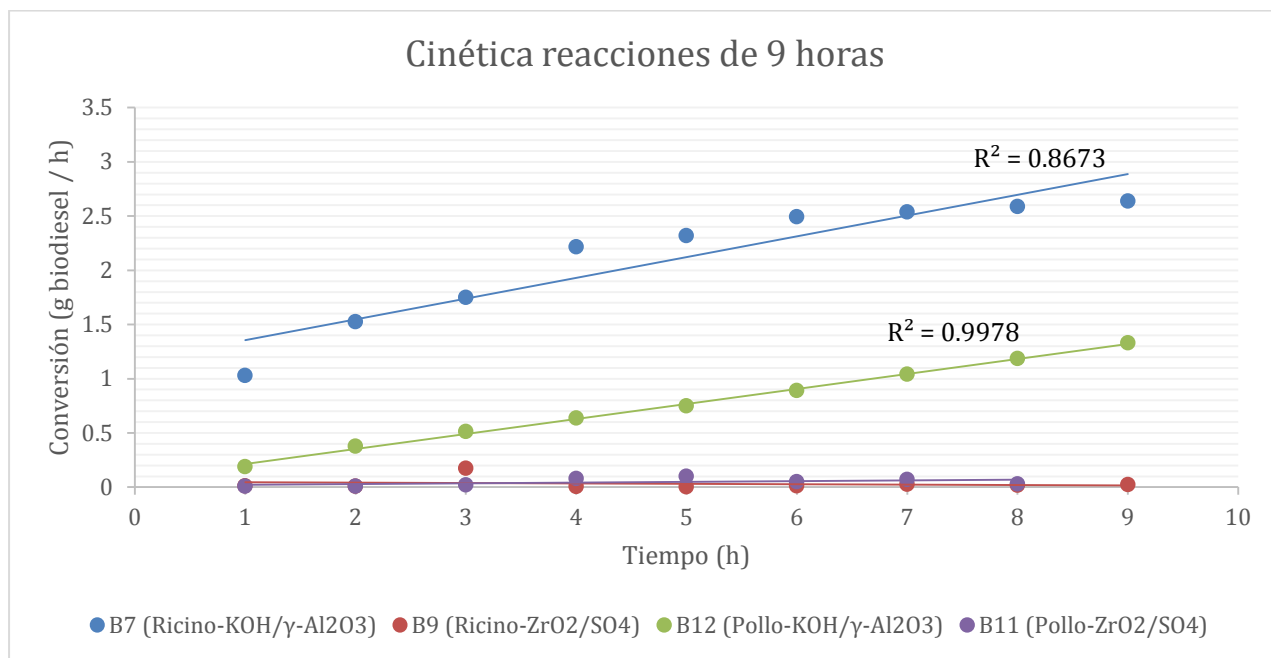


FIGURA 60. Gráfica de cinética de las reacciones de 9 horas

Las cinéticas de reacción usando los datos experimentales de cada producto obtenido muestran que en algunos casos que es de primer orden al inicio del proceso y segundo orden al final de la reacción. También indica que el proceso se hace más lento debido a las posibles desactivaciones de los sitios activos para formar dichos productos (Ravindra y Raman, 2015). Cabe destacar que los órdenes de reacción en las diferentes reacciones indica que productos son más fácilmente formados dependiendo de las cantidades de reactivos usados, la cantidad de catalizador empleado y sobre todo, las condiciones de reacción que se emplearon en cada experimento.

Basándose en las gráficas de cinética, se puede decir que las velocidades de reacción para obtener un producto de alta calidad se han conseguido con los catalizadores usados. Nuevamente, se puede afirmar que las velocidades y constantes cinéticas están acorde a los datos experimentales obtenidos, si bien con desviaciones, los valores están dentro de los parámetros esperados en reacciones de transesterificación.

Las figuras 61, 62, 63 y 64 muestran algunos cromatogramas de las reacciones hechas.

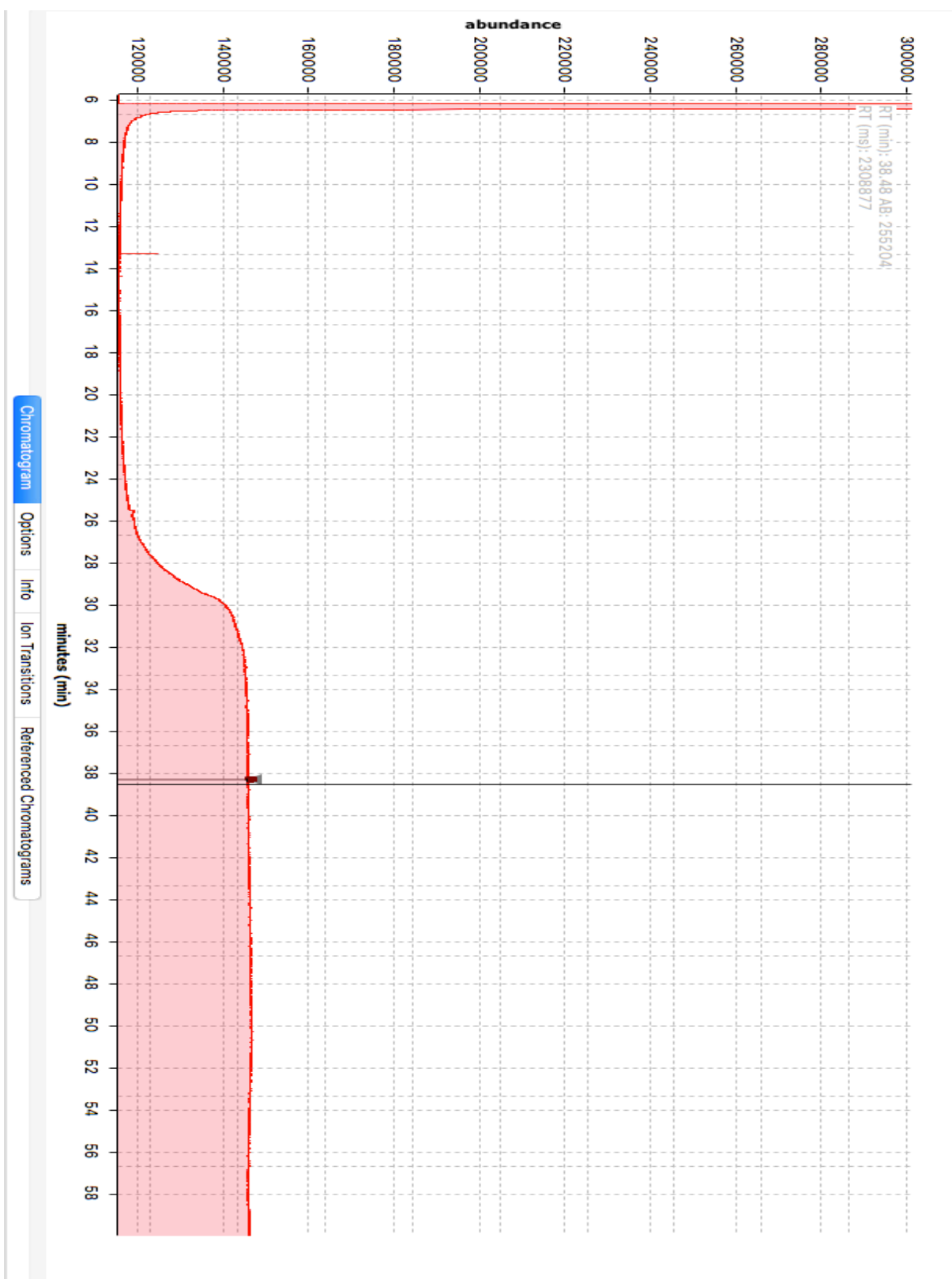


FIGURA 61. CROMATOGRAMA BIODIESEL 5 (B5) DE 60 MINUTOS

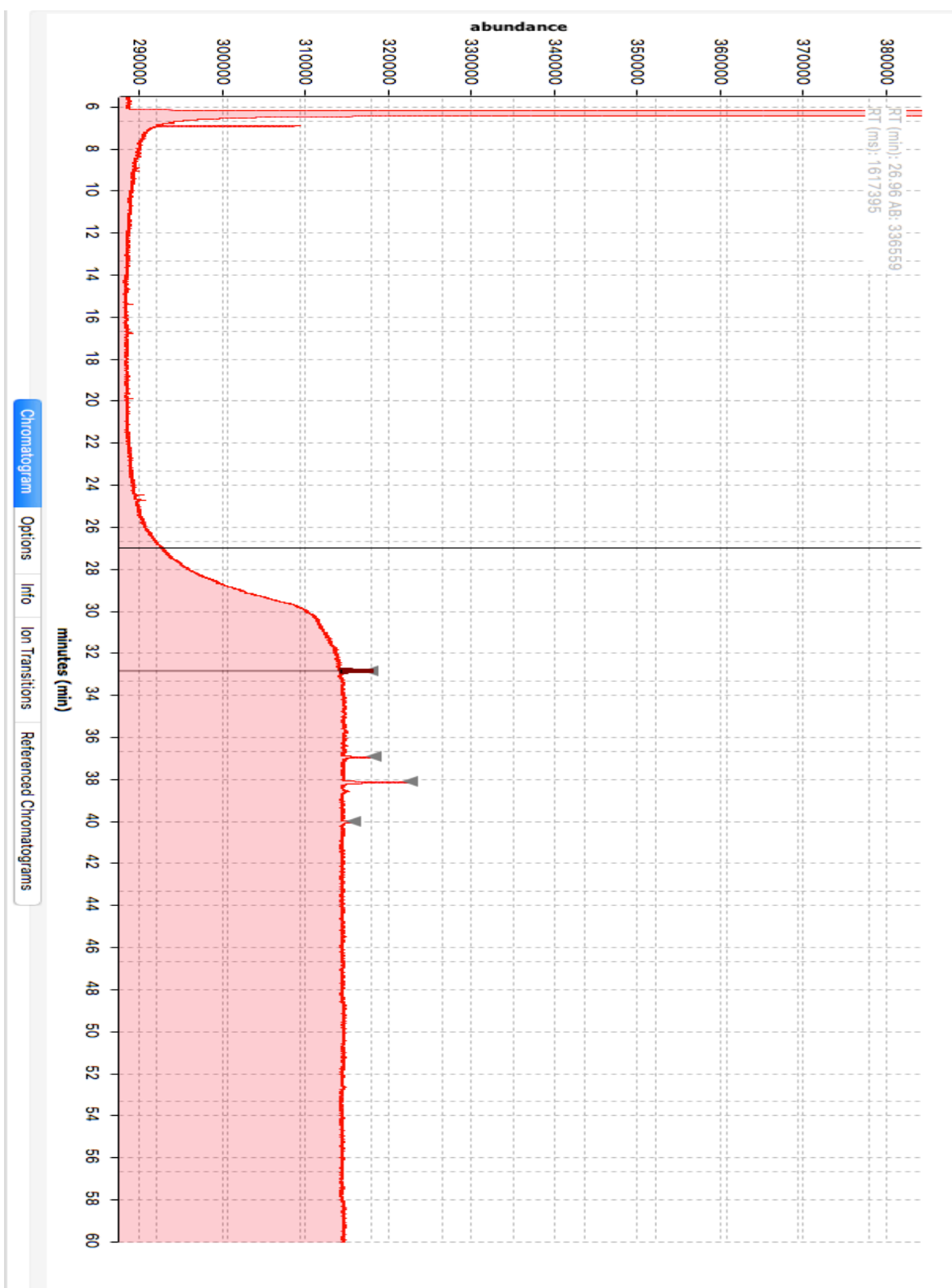


FIGURA 62. CROMATOGRAMA DE BIODIESEL 10 (B10) DE 6 HORAS

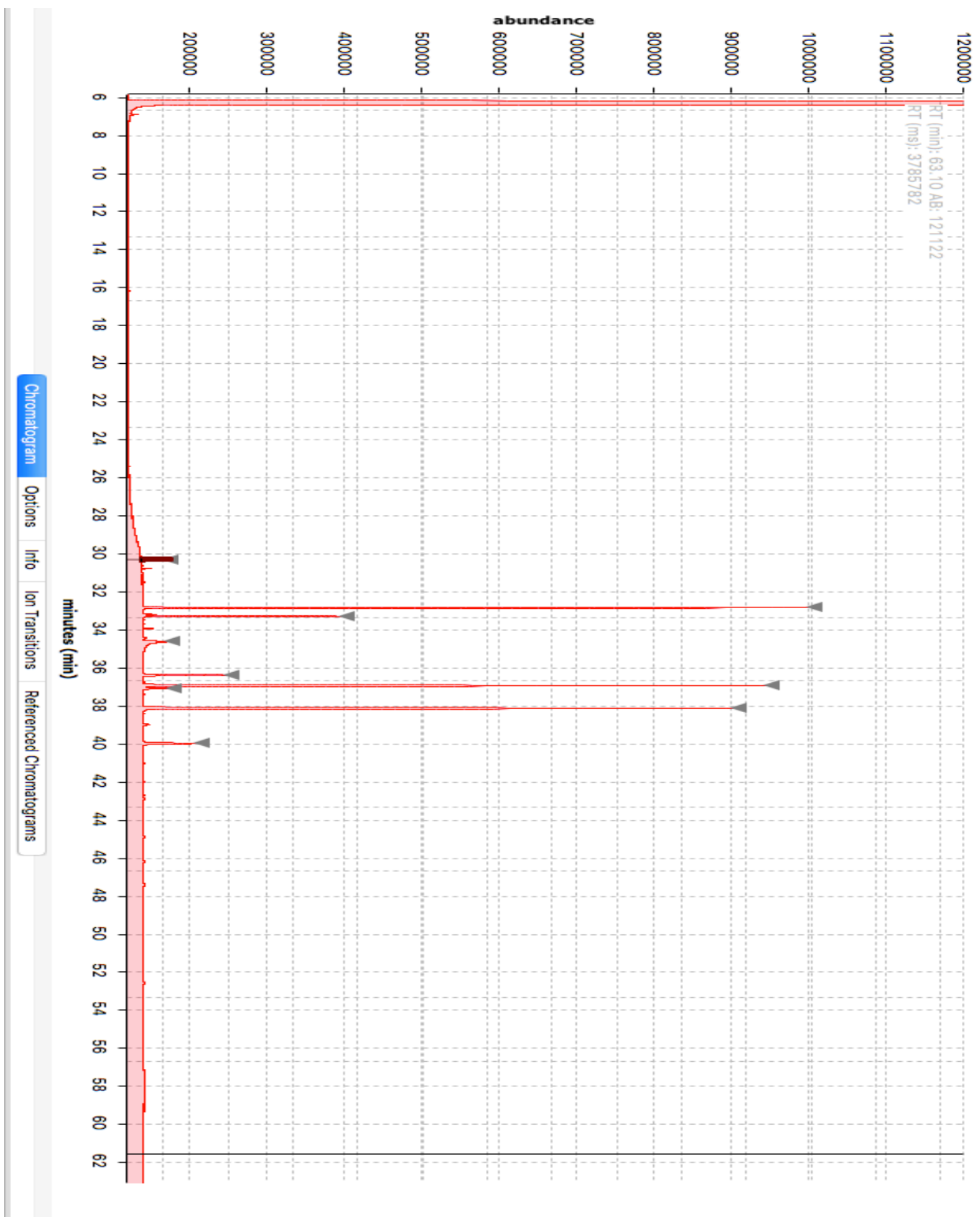


FIGURA 63. CROMATOGRAMA BIODIESEL 3 (B3) DE 60 MINUTOS

De igual manera se presenta el cromatograma del estándar utilizado Supelco 37 Component FAME Mix 1ml. Catálogo CRM47885.

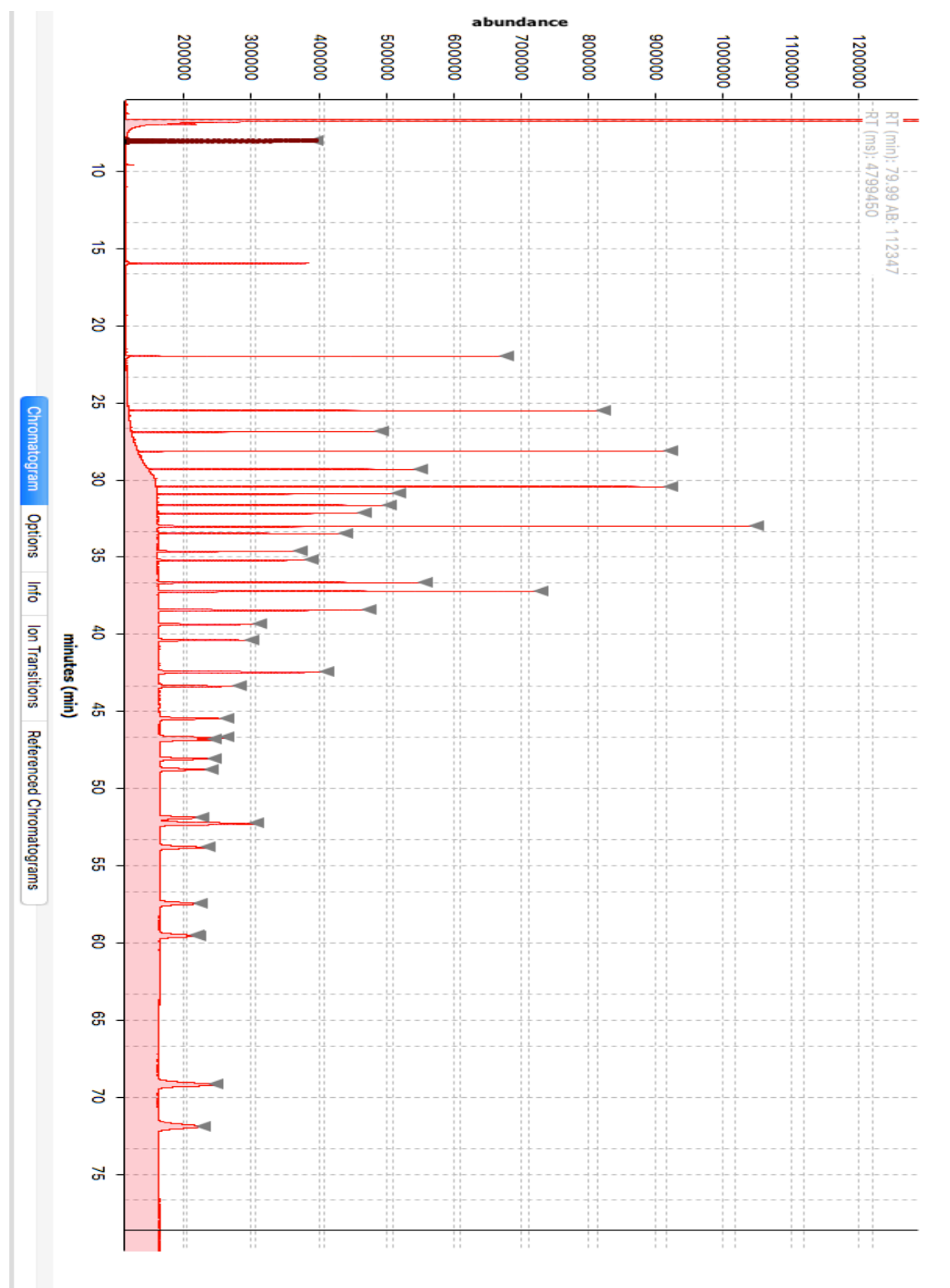


FIGURA 64. CROMATOGRAMA DEL ESTANDAR DE METIL ESTERES UTILIZADO

## 9 CONCLUSIONES

---

El aprovechamiento de la grasa de pollo cruda y el aceite de ricino para la producción de biodiesel es viable, dándoles un valor agregado, con lo que se evita la acumulación de residuos sólidos (grasa de pollo) y competencia con la industria alimenticia (ricino). Además, la mejor forma de extraer los aceites es sin el uso de solventes.

La síntesis de los catalizadores por los dos métodos hechos es posible y, tomando en cuenta los resultados de la caracterización, se tuvieron materiales con grandes áreas superficiales y nanoestructurados.

Es posible la síntesis de biodiesel con ambas materias primas, sin embargo, se pueden tener buenos rendimientos (mayores al 65%) con el aceite de pollo, alúmina soportada con hidróxido de potasio como catalizador en una relación de 1% en peso respecto al aceite y un tiempo de 6 horas; ya que con estas condiciones el biodiesel es de mejor calidad comparado con las demás condiciones de reacción.

Se recomienda hacer un estudio similar evaluando reacciones que sean entre 2 y 5 horas, para hacer una comparación con la de 6 y poder determinar el tiempo más adecuado con el objetivo de reducir el consumo de energía durante la transesterificación.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

---

Acevedo, J. S., Garza Méndez, F. J., Sánchez Cervantes, E. M., & Aguirre Espinosa, J., (2014). Zirconia sulfatada como un catalizador para la síntesis de biodiesel. *Química Hoy. Chemistry Sciences*, 4(1), 23-29.

Ademe, (2002), Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France, France.

Almeida, T. A., Rodrigues, I. A., Estrela, T. S., Nunes, C. N. F., Machado, L. L., Leão, K. V. y otros autores. (2016). Synthesis of ethyl biodiesel from soybean oil, frying oil and chicken fat, using catalysts based on vanadium pentoxide. *Energy*, 97, 528-533.

Alptekin, E., Canakci, M., & Sanli, H. (2014). Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. *Waste Management*, 34(11), 2146-2154.

Amaya, B., Becerra, S., Acevedo, P., (2008), evaluación del análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera empleando la metodología “de la cuna a la cuna”, *Revista Ion*, 21 (1), 17-26.

Armendáriz, J., Lapuerta, M., Zavala, F., García-Zambrano, E., & del Carmen Ojeda, M. (2015). Evaluation of eleven genotypes of castor oil plant (*Ricinus communis* L.) for the production of biodiesel. *Industrial Crops and Products*, 77, 484-490.

Arteaga, H., Siche, R., Pagador, S., & Cáceres, H. (2010). Efecto de la temperatura y tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico de biodiesel a partir de grasa refinada de pollo. *Scientia Agropecuaria*, 1(1), 37-45.

Ataz, E. M., & de Mera Morales, Y. D. (2004). Contaminación atmosférica (Vol. 45). Universidad de Castilla La Mancha.

Awad, S., Paraschiv, M., Varuvel, E. G., & Tazerout, M. (2013). Optimization of biodiesel production from animal fat residue in wastewater using response surface methodology. *Bioresource technology*, 129, 315-320.



Banerjee, B., Bhunia, S., & Bhaumik, A. (2015). Self-assembled sulfated zirconia nanocrystals with mesoscopic void space synthesized via ionic liquid as a porogen and its catalytic activity for the synthesis of biodiesels. *Applied Catalysis A: General*, 502, 380-387.

Baskar, G., & Soumiya, S. (2016). Production of biodiesel from castor oil using iron (II) doped zinc oxide nanocatalyst. *Renewable Energy*.

Bateson, T. F., & Schwartz, J. (2004). Who is sensitive to the effects of particulate air pollution on mortality?: a case-crossover analysis of effect modifiers. *Epidemiology*, 15(2), 143-149.

Benjumea P., Agudelo J., Ríos L. (2009). Biodiésel: producción, calidad y caracterización. Universidad de Antioquia, Colombia.

Bergada O., (2007), Diseño de catalizadores para una obtención limpia de 2-feniletanol, Departament de Química Física y Inorgánica, Universidad Rovira i Virgili, p. 25-48.

Berman P., Nizri S. and Wiesman Z. (2011). Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35 (35), 2861-2866.

Bhatti, H. Hanif, M. Qasim, M. Rehman, A. Biodiesel production from waste tallow. *Fuel* 2008, Vol. 87, pp 2961–2966.

Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*. Academic press.

Castañeda M., Braña D., Martínez W. (2013). Carne de pollo a la mexicana. Folleto técnico. México

Churchill, S. W. (1997). The reduction of air pollution by improved combustion. *Energy conversion and management*, 38(10), 1335-1341.

CIEMAT, (2007), Balances energéticos de los biocarburantes de origen vegetal: 1. Etanol de cereales; 2. Biodiesel de oleaginosas, España.

Condorchem envitech. (2013). Aplicaciones industriales del aceite de ricino. [en línea]. Consultado el 02 de junio de 2016. Disponible en:

<http://blog.condorchem.com/es/aplicaciones-industriales-del-aceite-de-ricino/#.V2nYs1fH6Rs>

DAFF (Department of Agriculture, Fisheries and Forestry). (2014). Castor oil plant (*Ricinus communis*). State of Queensland, Australia.

Dahl, C. A. (2012). Measuring global gasoline and diésel price and income elasticities. *Energy Policy*, 41, 2-13.

Davis, Mark E. and Davis, Robert J. (2003) *Fundamentals of chemical reaction engineering*. McGraw-Hill Higher Education , New York, NY.

Díaz C., (2010), *Catálisis*, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 1-3.

Deutschmann, O., Knözinger, H., Kochloefl, K., & Turek, T. (2009). Heterogeneous catalysis and solid catalysts. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.

Di, Y., Cheung, C. S., & Huang, Z. (2009). Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diésel engine fueled with ultra-low sulfur diésel fuel blended with biodiesel from waste cooking oil. *Science of the total environment*, 407(2), 835-846.

Droguett, S., 1893, *Elementos de Catálisis Heterogénea*. EN: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington, D.C., p. 35-36.

Encinar, J. M., Sánchez, N., Martínez, G., & García, L. (2011). Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. *Bioresource Technology*, 102(23), 10907-10914.

EPA, (2014), Learn About Biodiesel.

(Publicación en línea). Consultado el 20 de febrero de 2015. Disponible en:

<http://www.epa.gov/region9/waste/biodiesel/questions.html#what>

Euro Fuel Tech, American and European Biodiesel Cuality Standars, [en línea]. Consultado el 28 de febrero de 2015. Disponible en:

[http://www.eurofueltech.com/Upload/File/American\\_and\\_European\\_Biodiesel\\_Quality\\_Standards..pdf](http://www.eurofueltech.com/Upload/File/American_and_European_Biodiesel_Quality_Standards..pdf)

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2013). Revisión del desarrollo avícola.

Ferrer Carbonell, J. A., & Escalante Semerena, R. I. (2009). Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud en la Zona Metropolitana del Valle de México. Economía informa, (360), 22-39.

Gangaiah, B. (2008). Agronomy of kharif crops. World, 7(3.28), 441.

Greenpeace, (1999), Diesel: Hechos más Destacados Sobre las Emisiones, edición en español, Madrid, España.

Gerón C. (2015). Perspectivas de la producción de carne de pollo (I). El economista, México. [en línea]. Consultado el 02 de junio de 2016. Disponible en:

<http://eleconomista.com.mx/columnas/agro-negocios/2015/04/15/perspectivas-produccion-carne-pollo-i>

Giraldi, M., 2013, En análisis de ciclo de vida. La ecología industrial en México, México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, p. 93-115.

Gómez, J., Samaniego, J., Antonissen, M., (2008), Consideraciones Ambientales en Torno a los Biocombustibles Líquidos, Santiago de Chile, Chile.

González, C. (2008). La Higuierilla (*Ricinus Communis* L.), notas y usos de Elia Méndez Salazar. Tlahui Medic. No. 25.

Gürü Gürü, M., Koca, A., Can, Ö., Çınar, C., & Şahin, F. (2010). Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy*, 35(3), 637-643.

Hernández, M., Zamarripa, A., Teniente, R., González, A., Solís, J. (2012). Guía técnica para la producción de higuierilla (*Ricinus communis* L.) en Guanajuato. Folleto técnico. México.

IICA, (2009), Manual de biocombustibles, Perú.

IMCO, 2013, calculadora de riesgos por contaminación atmosférica. Consultado el 15 de junio de 2015. Disponible en

<http://imco.org.mx/wp-content/uploads/2013/09/Comunicado-de-prensa-Calculadora-de-Riesgos-final-2.pdf>

INEGI, (2016) México en cifras, Información nacional por entidad federativa y municipios. Consultado el 15 de diciembre de 2016. Disponible en:

<http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=09>

INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México, México.

IPCC, 2001, Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas.

ISO, Norma ISO 14040:2006, [en línea], (2006). Consultado el 11 de junio de 2016. Disponible en:

[http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37456)

Jiménez J., Cordero T., Rodríguez J. (2008). Hacia un uso sostenible de los recursos naturales, Cuadernos Unia, Universidad Internacional de Andalucía, p. 65-77.

Korbitz W. (1999) Biodiesel production in Europe and North America. An encouraging prospect. *Renew Energy*, 16:1078–83.

Kumar, M., (2007), Studies on Synthesis, Characterization and Catalytic Activity of Nano-Crystalline Sulfated Zirconia (tesis de doctorado), Central Salt & Marine Chemicals Research Institute Gujarat, India.

Liu, L., Wen, Z., & Cui, G. (2015). Preparation of Ca/Zr mixed oxide catalysts through a birch-templating route for the synthesis of biodiesel via transesterification. *Fuel*.

Livage, J., Henry, M., & Sanchez, C. (1988). Sol-gel chemistry of transition metal oxides. *Progress in solid state chemistry*, 18(4), 259-341.

MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). (2016). Carne y productos cárnicos. España. [en línea]. Consultado el 29 de junio de 2013. Disponible en:

<http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-buenas-practicas/buenas-practicas-sobre-alimentacion/carnes.aspx>

Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y. & Wang, C. (2016). Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. *Energy conversion and management*, 123, 487-497.

Ministerio de Medio Ambiente, (2006), Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte: Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel, España.

Mirzajanzadeh, M., Tabatabaei, M., Ardjmand, M., Rashidi, A., Ghobadian, B., Barkhi, M., & Pazouki, M. (2015). A novel soluble nano-catalysts in diésel–biodiesel fuel blends to improve diésel engines performance and reduce exhaust emissions. *Fuel*, 139, 374-382.

Mofijur, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Atabani, A. E., Arbab, M. I., Cheng, S. F., et al. (2014). Properties and use of Moringa oleifera biodiesel and diésel fuel blends in a multi-cylinder diésel engine. *Energy Conversion and Management*, 82(0), 169-176.

Morales, G., Bautista, L. F., Melero, J. A., Iglesias, J., & Sánchez-Vázquez, R. (2011). Low-grade oils and fats: effect of several impurities on biodiesel production over sulfonic acid heterogeneous catalysts. *Bioresource technology*, 102(20), 9571-9578.

Mortimer, E., 1983, *Química*, México D. F., Grupo Editorial Iberoamericano, pp 336-340.

Muñoz, M., Paz, J., & Quiroz, C. (2007). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de adultos que laboran en diferentes niveles de exposición. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 25(2).

NGK, Normas Euro, [en línea], (2013), NGK Spark Plug Europe, Consultado el 13 de mayo de 2015. Disponible en:

<http://www.ngk.de/es/tecnologia-en-detalle/sondas-lambda/aspectos-basicos-de-los-gases-de-escape/normas-euro/>

Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., & Bruno, R. (2015). A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, 89, 205-213.

NPTEL, Homogeneous catalysis, [en línea], (2014). Consultado el 11 de junio de 2016. Disponible en:

<http://nptel.ac.in/courses/103103026/32>

NREL, (1998), *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus*, U. S.

Ocsachoque M., (2012), *Desarrollo de catalizadores metálicos soportados para la obtención de gas de síntesis*, Departamento de Química, Universidad Nacional de la Plata, Argentina.

OPEP/OPEP. (2016). Annual Statistical Bulletin. Austria.

Pacific Biodiesel, (2015), History of biodiesel fuel. (Publicación en línea). Consultado el 2 de junio de 2015. Disponible en:

<http://www.biodiesel.com/biodiesel/history/>

Panwar, N. L., Shrirame, H. Y., Rathore, N. S., Jindal, S., & Kurchania, A. K. (2010). Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. *Applied Thermal Engineering*, 30(2), 245-249.

Parra L., 2012, Evaluación catalítica de la zirconia sulfatada en la transesterificación de triglicéridos presentes en el aceite de palma africana, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

PEMEX (Subdirección de Auditoría en Seguridad Industrial y Protección Ambiental, Gerencia de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional, Hoja de Seguridad de Distancias). 2008. PEMEX-DIESEL UBA, [en línea], (2008), PEMEX, México. Consultado el 12 de mayo de 2015.

Disponible en: [http://www.pemex.com/productos/Documents/pemex\\_diesel\\_uba\\_110201.pdf](http://www.pemex.com/productos/Documents/pemex_diesel_uba_110201.pdf)

Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the air & waste management association*, 56(6), 709-742.

Quintana J. (2011). AVITECNIA Manejo de las Aves Domésticas más comunes. Editorial Trillas. México.

Ravindra P., y Raman K., (2015), Production of biodiesel using lipase encapsulated in  $\kappa$ -carrageenan, ed. Springer Cham Heidelberg, London, U. K., p. 27-34

Reddy B. & Patil M., 2009. Organic syntheses and transformations catalyzed by sulfated zirconia. *Chemical reviews*, 109(6), 2185-2208.

Rico, P., Teniente, O., González, A., Hernández, M., Solís, B., Zamarripa, C. (2011). Guía para cultivar higuera (Ricinus communis L.) en Michoacán. Folleto técnico. México.

Ríos L., Castrillón A., Zuleta E., (2009) Producción de Biodiesel de Aceite de Palma con Catalizadores Básicos Heterogéneos Comparados con los Homogéneos Convencionales, Revista del Instituto de Energía (Julio- Diciembre), Universidad Nacional de Colombia, p. 45-52

Robles, S. (1980). Producción de oleaginosas y textiles. Ed. LIMUSA. México, p. 507-518.

Romano, S. D., & Sorichetti, P. A. (2011). Dielectric spectroscopy in biodiesel production and characterization. Springer Science & Business Media.

Romero, B., 2003, El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental., Boletín IIE, p. 91-97

Romieu, I., Gouveia, N., Cifuentes, L. A., de Leon, A. P., Junger, W., Vera, J., ... & Tzintzun-Cervantes, G. (2012). Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study). Research report (Health Effects Institute), (171), 5-86.

Rubio, E., MendozaAnaya, D., González, P., & Castaño, V. M. (2003). Termoluminiscencia de circonia sulfatada expuesta a radiación gamma. In Memorias VI Conferencia Internacional XVI Congreso Nacional sobre Dosimetría de Estado Sólido (Vol. 225, p. 229).

Sartori G. & Maggi R., 2009, Advances in Friedel-Crafts acylation reactions: catalytic and green processes. CRC Press.

Sattanathan, R. (2013). Production of biodiesel from castor oil with its performance and emission test. International Journal of Science and Research (IJSR), 2319-7064.

SAGARPA. (2015). Perfilan a México como importante productor de higuera y aceite de ricino a nivel mundial. México. [en línea]. Consultado el 04 de mayo de 2016. Disponible en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/bajacalifornia/Boletines/Paginas/2015B377.aspx>



Salimon, J., Noor, D. A. M., Nazrizawati, A. T., Firdaus, M. M., & Noraishah, A. (2010). Fatty acid composition and physicochemical properties of Malaysian castor bean *Ricinus communis* L. seed oil. *Sains Malaysiana*, 39(5), 761-764.

Sánchez, N. (2015). Obtención de biodiesel mediante transesterificación del aceite de ricino y grasas animales. Aprovechamiento energético de la glicerina como subproducto del proceso, Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura, España.

SEMARNAT, (2012), Inventario Nacional de Emisiones de México en 2005. México.

Shrirame, H. Y., Panwar, N. L., & Bamniya, B. R. (2011). Bio diesel from castor oil—a green energy option. *Low Carbon Economy*, 2(01), 1.

Silva R., Hernandez J., Castillo A., Melo J., Garcia R., Picquart M., López T. (2015). Effect of  $\text{CeO}_2$  on the textural and acid properties of  $\text{ZrO}_2\text{--SO}_4^{2-}$ , *Catalysis today*, 107, 838-843.

Soares, L., Milani, M., de Macedo, N.. (2007), Ricino: el productor pregunta, la EMBRAPA responde. Embrapa, Brasília, Brasil.

Solís C., 2011, Influencia del método de preparación del catalizador de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dopada con Fe en la combustión catalítica del tricloroetileno (TCE), Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Tichit, D., Coq, B., Armendariz, H., & Figueras, F. (1996). One-step sol-gel synthesis of sulfated-zirconia catalysts. *Catalysis letters*, 38(1-2), 109-113.

UNA (Unión Nacional de Avicultores). (2016). Compendio de Indicadores Económicos del sector avícola 2016. México. [en línea]. Consultado el 02 de julio de 2016. Disponible en:

<http://www.una.org.mx/index.php/component/content/article/2-uncategorised/19-indicadores-economicos>

USAID (United States Agency for International Development). (2010). Producción avícola, negocio en crecimiento. Estados Unidos y Paraguay.

USDA (United States Department of Agriculture). (2016). Livestock and Poultry: world markets and trade. United States.

Valderrama, J., Mery, A., y Aravena, F. (1994). La higuera y su principal producto, el aceite de ricino. Parte 1. Aspectos generales. Información tecnológica, 5(1), 87-91.

Van Leeuwen, P. W. (2006). Homogeneous catalysis: understanding the art., Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, Netherlands.

Veljković, V. B., Banković-Ilić, I. B., & Stamenković, O. S. (2015). Purification of crude biodiesel obtained by heterogeneously-catalyzed transesterification. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 500-516.

Yadav, G. D., & Nair, J. J. (1999). Sulfated zirconia and its modified versions as promising catalysts for industrial processes. Microporous and mesoporous materials, 33(1), 1-48.

Zecca, A., & Chiari, L. (2010). Fossil-fuel constraints on global warming. Energy Policy, 38(1), 1-3.

Zambrano, J. (2014). Evaluación del Proceso de Producción de Biodiesel a Partir de Residuos de Grasa de Pollo Vía Catálisis Enzimática.